PHYSIOLOGIE EXPÉRIMENTALE

TRAVAUX

DU LABORATOIRE DE M. MAREY

EN VENTE A LA MÊME LIBRAIRIE :

PHYSIOLOGIE EXPÉRIMENTALE. — École pratique des hautes études. Travaux du laboratoire du professeur Marey. — I. Année 1875, 1 beau volume grand in-8°, avec 160 figures dans le texte . . . . 15 fr.

Ce volume contient les travaux suivants : *Du moyen d'utiliser le travail moteur de l'homme et des animaux*, par M. Marey. — *Mémoire sur la pulsation du cœur*, par M. Marey. — *Mouvement des ondes liquides pour servir à la théorie du pouls*, par M. Marey. — *La méthode graphique dans les sciences expérimentales*, par M. Marey. — *Recherches sur l'anatomie et la physiologie des nerfs vasculaires de la tête*, par M. François-Franck. — *Expériences sur la résistance de l'air, pour servir à la physiologie du vol des oiseaux*, par M. Marey. — *Pression et vitesse du sang*, par M. Marey.

CLICHY. — IMP. PAUL DUPONT, 12, RUE DU BAC-D'ASNIÈRES. (757 (10 6.)

ÉCOLE PRATIQUE DES HAUTES ÉTUDES

PHYSIOLOGIE EXPÉRIMENTALE

TRAVAUX

DU

LABORATOIRE DE M. MAREY

PROFESSEUR AU COLLÉGE DE FRANCE

II

ANNÉE 1876

Avec 194 figures dans le texte

PARIS

G. MASSON, ÉDITEUR

LIBRAIRE DE L'ACADÉMIE DE MÉDECINE

Boulevard St-Germain, en face de l'Ecole de Médecine

MDCCCLXXVI

PRÉFACE

Les travaux qui ont été faits cette année dans mon laboratoire ont été plus nombreux que ceux de l'année dernière ; cinq nouveaux expérimentateurs nous ont prêté leur concours ; aussi trouvera-t-on dans ces comptes rendus neuf mémoires sur des sujets très-variés. Trois thèses soutenues à la Faculté de médecine ont également été faites cette année dans le laboratoire (1).

Malgré la diversité des sujets traités dans ce volume, l'emploi d'une même méthode vient donner à cet ensemble une unité qu'on trouverait difficilement dans les recueils analogues. C'est que la méthode graphique étend sans cesse son domaine, s'appliquant à beaucoup de sujets nouveaux sans qu'on puisse prévoir où s'arrêtera cette extension si favorable à la clarté et à la précision des expériences.

Une rapide énumération des sujets traités dans ce volume

(1) Ce sont les thèses de doctorat en médecine de MM. Mocquot, Dubourg et Gautier (1875-1876).

sera le meilleur moyen de mettre sous les yeux des physiologistes les ressources nouvelles dont nous disposons et que je serai heureux de mettre à leur service.

Mémoire I. — *Du volume des organes dans ses rapports avec la circulation du sang.* — M. François-Franck, mon préparateur au collége de France, est l'auteur de ce travail ; reprenant les idées du Dr Piégu, et continuant les recherches ébauchées il y a quinze ans par Ch. Buisson, il a réussi à inscrire les plus légères variations qui se produisent dans la circulation d'un organe, d'après les changements de volume que celui-ci présente. Or, pour rendre saisissables ces changements de volume, on introduit une main ou un pied dans une caisse fermée et remplie de liquide. Suivant que l'organe immergé reçoit plus ou moins de sang dans ses vaisseaux, il augmente plus ou moins de volume, et, déplaçant ainsi des quantités d'eau variables, traduit, par des courbes analogues à celles du pouls, les changements que produisent dans son état circulatoire des influences mécaniques ou des actions vaso-motrices.

Mémoire II. — *Des excitations artificielles du cœur.* — Dans ce mémoire, je crois avoir établi que tous les faits singuliers et souvent contradictoires qui avaient été observés relativement à la manière dont le cœur se comporte quand on l'excite artificiellement, tiennent à ce que le muscle cardiaque ne réagit pas de la même façon aux différentes phases de sa révolution.

Réfractaire aux excitations faibles au moment où il entre en systole, le cœur obéit, au contraire, à ces mêmes excitations dans sa phase diastolique.

Mémoire III. — Dans son mémoire sur le *vol mécanique*, M. Tatin a fait preuve d'un esprit aussi persévérant qu'ingénieux. Au milieu de difficultés sans nombre, il est arrivé à construire un véritable schéma du vol de l'oiseau. Il a cherché à imiter dans sa fonction le type que nous fournit la nature, et s'en est plus rapproché que tous ceux qui, avant lui, avaient essayé une pareille imitation. Ces études se continuent du reste; nous en donnerons l'an prochain les nouveaux résultats.

Mémoire IV. — *Essai d'inscription des mouvements phonétiques.* — Sous ce titre, M. Rosapelly expose un nouveau moyen d'analyse de la phonation qui intéresse à la fois les linguistes et ceux qui s'adonnent à l'éducation des sourds-muets. Les premiers ont déjà obtenu, par cette méthode nouvelle, la solution de certaines questions relatives au mécanisme de la parole; les seconds trouveront dans l'inscription des différents actes de la parole le moyen de remplacer par la vue l'ouïe qui manque à leurs élèves. Dans les expériences de M. Rosapelly, les mouvements du larynx, des lèvres et du voile du palais s'inscrivent d'eux-mêmes, avec leurs rapports de durée et de succession qui varient suivant la nature des sons qu'on émet. Si cette méthode se développe et se complète, le sourd pourra contrôler par lui-même le plus ou moins de correction du son qu'il émet, en voyant si les courbes qu'il inscrit en parlant ressemblent aux types qu'on lui donnera à imiter. L'enseignement de la parole à un sourd serait donc très-analogue à celui de l'écriture.

Mémoire V. — *La méthode graphique dans les sciences expérimentales.* — Ce mémoire fait suite à ce que j'ai publié l'an dernier sur le même sujet. On y trouvera groupés aussi

méthodiquement qu'il m'a été possible, les moyens d'inscrire toutes sortes de mouvements. Dans cette exposition, je me suis efforcé de passer graduellement des cas les plus simples aux plus compliqués. On verra dans les derniers chapitres que la méthode ne s'étend plus seulement à l'inscription des mouvements proprement dits, mais qu'elle s'applique déjà à des changements d'états autrefois insaisissables, des changements de force, de poids, de tension électrique, etc.

MÉMOIRE VI. — *Effets des excitations des nerfs sensibles sur le cœur, la respiration et la circulation.*—M. François-Franck, auteur de ce mémoire, part d'une expérience déjà connue, mais dont on n'avait pas fourni d'interprétation complète, ni tiré tout le parti possible. On fait passer sous les narines d'un lapin une éponge imbibée de chloroforme ; aussitôt les mouvements du cœur et ceux de la respiration s'arrêtent pendant un temps plus ou moins long.

Quelle est la nature de l'impression qui a produit cette action réflexe? Par quels nerfs a passé l'action centripète? Quels ont été les centres de réflexions? Par quels nerfs ont passé les actions centrifuges?

Toutes ces questions exigeaient, pour être résolues, une longue série de recherches qui ont été conduites avec autant de méthode que d'ingéniosité. Grâce à la netteté des tracés qui les accompagnent, les expériences de M. François-Franck, ne laissent rien à désirer pour la clarté; elles ouvrent des horizons nouveaux à la physiologie des actions nerveuses et leur portée dépasse beaucoup ce que ferait prévoir le titre du mémoire.

MÉMOIRE VII. — *Innervation de l'appareil modérateur du cœur chez la grenouille*, par le Dr de Tarchanoff. — Ce travail est une suite de ceux que l'auteur avait déjà faits avec M. Puelma. L'emploi d'instruments très-précis lui a permis de pousser plus loin son analyse ; de déterminer, par exemple, le temps variable qui s'écoule entre le moment où l'on excite le nerf vague et celui où le cœur suspend ou ralentit ses battements. Donders avait déjà signalé que ce temps est variable ; M. de Tarchanoff a montré que la durée de ce retard varie suivant la phase de la révolution cardiaque où cette excitation s'est produite. — L'auteur a vu aussi que, pour exciter utilement le nerf vague, il faut lui appliquer des excitations multiples.

De nombreuses expériences comparatives sur les mammifères et sur les grenouilles ont montré à M. de Tarchanoff que l'excitation successive des deux pneumogastriques n'agissait pas de la même manière sur le cœur des uns et des autres, et il a conclu à un mode de terminaison différent des pneumogastriques dans l'appareil ganglionnaire intra-cardiaque : chez les mammifères, les deux nerfs modérateurs aboutiraient à un appareil commun; chez les grenouilles, chaque nerf se terminerait dans un appareil ganglionnaire indépendant.

MÉMOIRE VIII. — Dans ce travail, qui fait suite à celui que j'ai publié l'année dernière sur *la pression et la vitesse du sang*, je me suis attaché à deux points principaux :

1° *La mesure de la pression dans les artères de l'homme ;*

2° La détermination des causes d'erreur qui se sont présentées dans les expériences de Fick et de Gradle sur *le rapport de la pression ventriculaire avec la pression aortique.*

1° La pression artérielle chez l'homme peut être mesurée par la contre-pression que supporte un organe immergé, la main, par exemple. On voit que le sang artériel cesse de pénétrer dans la main quand la contre-pression s'élève à 16,18 c. de mercure en moyenne.

2° La pression ventriculaire est toujours plus élevée que la pression aortique. Si on a cru observer que, dans le cas de grande fréquence des battements du cœur, la pression aortique était plus forte que la pression ventriculaire, la raison en est dans la lenteur des indications du manomètre à ressort. Ces indications oscillent, en effet, quand les battements du cœur sont fréquents, autour de la pression *moyenne* qui est évidemment plus faible dans le ventricule que dans l'aorte, puisque pendant les phases de relâchement du ventricule, la pression peut y tomber au-dessous de zéro.

Mémoire IX. — Dans ce mémoire, M. Salathé a exposé le résultat de recherches déjà longues sur le mécanisme de *la circulation dans la cavité céphalo-rachidienne.*

L'auteur a eu pour objet principal de démontrer que le cerveau est animé de mouvements d'expansion et de resserrement comme tous les organes vasculaires, aussi bien chez l'adulte, dont les parois crâniennes sont inextensibles, que chez l'enfant pourvu de fontanelles et chez les animaux trépanés. Ces mouvements du cerveau ont été enregistrés en même temps que les variations de la pression artérielle et les mouvements respiratoires. L'auteur établit la subordination des mouvements du liquide céphalo-rachidien aux variations de volume du cerveau.

Un grand nombre d'observations sur l'homme et d'expériences sur les animaux, une revue critique des diverses

théories émises par les auteurs, donnent au travail de M. Salathé un intérêt physiologique et médical qui n'échappera point au lecteur.

MAREY.

Paris, le 8 octobre 1876.

TABLE DES MÉMOIRES

CONTENUS DANS CE VOLUME.

PHYSIOLOGIE EXPÉRIMENTALE

Travaux du Laboratoire de M. le Professeur MAREY.

I.

DU VOLUME DES ORGANES DANS SES RAPPORTS AVEC LA CIRCULATION DU SANG,

par le Dr FRANÇOIS-FRANCK.

« On peut considérer les changements de volume des organes comme l'expression la plus fidèle des changements qui se produisent dans le calibre des vaisseaux. »

MAREY.— *Phys. méd. de la circulation du sang*, p. 313.

INTRODUCTION.

Les tissus vasculaires sont le siége d'une série de variations de température, de couleur, de consistance, de volume, etc., tous phénomènes subordonnés aux variations du calibre des vaisseaux qui constituent la majeure partie de la trame de ces tissus. J'ai dirigé mes recherches sur l'une de ces variations en particulier, sur les *changements de volume*, l'étude de ce phénomène pouvant fournir de précieux renseignements sur l'état de la circulation dans l'organe exploré, puisqu'il est directement en rapport avec les modifications du calibre des vaisseaux.

Pour obtenir de cette recherche une plus grande somme de détails, j'ai employé des appareils à indications continues, et

d'une grande sensibilité : j'ai pu ainsi apprécier dans une même expérience les variations rapides et périodiques du calibre des vaisseaux dans leurs rapports avec la fonction cardiaque, les changements moins brusques, mais également périodiques, que la fonction respiratoire détermine dans la circulation périphérique, et, en outre, toutes les modifications rapides ou prolongées que j'ai provoquées expérimentalement sur moi-même, en me soumettant à des influences variées.

L'idée de ce travail m'a été inspirée par mon excellent maître, le professeur Marey, qui a bien voulu mettre à ma disposition ses conseils éclairés et les précieuses ressources de la méthode graphique dont il a poussé si loin les applications physiologiques.

Grâce à son bienveillant concours, j'ai pu faire des recherches suivies sur ce sujet, depuis le mois de mars 1875 jusqu'au mois de février 1876, et le résumé de quelques-uns des résultats obtenus a été communiqué au Congrès scientifique de Nantes, en août 1875, et à l'Académie des sciences de Paris, le 13 avril 1876.

L'exploration des *changements du volume des organes sous l'influence de la circulation* peut s'opérer, dans les conditions les plus simples, à l'aide d'un appareil à déplacement contenant l'organe ou le segment de membre en expérience, et de l'eau à la température ambiante. Un tube de petit calibre, ouvert en haut, étant branché verticalement à la partie supérieure du récipient principal, et constituant la seule communication avec l'air extérieur, on voit que chaque expansion du tissu vasculaire immergé, de la main par exemple, en rapport avec l'afflux du sang artériel, s'accompagne de l'ascension d'une certaine quantité d'eau dans le tube ; que chaque retrait du tissu, déterminé par l'écoulement du sang à travers les vaisseaux veineux, rappelle dans l'appareil la colonne oscillante.

Ces oscillations alternatives affectent avec les différentes périodes de la révolution cardiaque les mêmes rapports que le pouls d'une seule artère explorée dans la même région. C'est qu'en effet, les oscillations de cette colonne liquide rendent sensible un phénomène imperceptible à l'exploration directe, les *variations de volume totalisées* des vaisseaux de petit calibre,

la somme des dilatations et resserrements de ces vaisseaux que traduisent les changements de volume rhythmés avec le cœur.

En outre de ces oscillations de cause *cardiaque*, la colonne mobile du tube vertical présente des excursions plus étendues, plus lentes, combinées avec les premières. Ces grandes oscillations sont rhythmées avec les *mouvements respiratoires*, et, *en général*, descendantes pendant l'inspiration, ascendantes pendant l'expiration.

Voilà ce qu'on peut voir en plongeant la main dans un vase qu'on remplit d'eau, et dont la cavité ne communique avec l'extérieur que par un tube vertical de petit calibre : l'amplitude de l'oscillation est d'autant plus considérable que le diamètre de ce tube est plus étroit, et, si l'on veut se contenter de suivre le sens des phénomènes, il est évidemment plus avantageux d'employer dans cette expérience un tube de faible diamètre ; mais cette amplification du mouvement ne s'obtient qu'au détriment de la précision. J'aurai bientôt l'occasion d'insister sur ce point que je signale simplement ici.

Ces mouvements, inaccessibles à la vue et au toucher dans les conditions ordinaires, sont souvent mis en évidence par certaines lésions des tissus qui permettent au chirurgien de constater le double phénomène d'expansion systolique et de retrait diastolique des petits vaisseaux. Les *tumeurs érectiles*, par exemple, constituées par une trame éminemment vasculaire, ne doivent la mobilité si apparente de leur tissu qu'à l'expansion qu'y détermine l'afflux du sang, et à la diminution de volume qui correspond au départ de ce sang par les veines.

Encore, pour bien constater ce double mouvement dans les nœvus, dans les anévrysmes cirsoïdes ou dans les tumeurs pulsatiles plus profondes (anévrysmes des os, par exemple), faut-il embrasser la masse érectile avec la main. La netteté du phénomène est bien plus grande, son examen plus aisé, quand une lésion osseuse met à découvert une cavité plus ou moins profonde et anfractueuse creusée dans le tissu si vasculaire d'un os ; là, chaque pansement constitue une expérience complète et dont la nature fait tous les frais : le liquide, sang ou pus, monte et descend dans la plaie ; la lumière, se réfléchissant sur cette surface mobile, permet d'en suivre facilement tous les changements de niveau.

Les anciens chirurgiens connaissaient bien ce phénomène des mouvements du pus osseux, et la tradition nous a transmis le résultat de leurs observations sur le synchronisme des petites oscillations du niveau du liquide et des battements du pouls.

Quoique ces observations cliniques remontent déjà bien loin, les physiologistes n'en avaient point proposé d'interprétation rationnelle, jusqu'à l'époque où le Dr Piégu fit connaître à l'Académie des sciences le résultat de ses premières recherches.

C'est à lui que revient incontestablement la priorité dans la question qui nous occupe.

NOTICE HISTORIQUE.

COMPARAISON DES MÉTHODES.

En 1846, le Dr Piégu (1) communiquait à l'Académie des sciences une note sur les *mouvements des membres dans leurs rapports avec le cœur et la respiration.* Il avait vu, en poussant une injection dans le membre inférieur d'un cadavre immergé dans un grand vase rempli d'eau tiède, le liquide du vase déborder quand l'injection distendait les vaisseaux; le débord augmentait dans la mesure de la pénétration de l'injection; il cessait quand cessait la poussée du piston.

Ce fut là le point de départ de ses recherches. Il enferma une extrémité tout entière ou une portion de membre dans une boîte contenant de l'eau tiède et fermée de toutes parts, sauf en un point qui donnait passage à un tube d'exploration.

Il vit alors, très-amplifiées, les oscillations que Poiseuille avait constatées en enfermant une grosse artère dans son appareil à déplacement : à chaque impulsion du cœur, à chaque diastole artérielle, correspondait une élévation du niveau du liquide; à chaque repos du cœur se produisait un abaissement en rapport avec l'évacuation du sang par les veines.

Ces oscillations *circulatoires* étaient combinées avec des excursions plus étendues, plus lentes, en rapport avec les mouvements *respiratoires*, et Piégu vit clairement que la dépres-

(1) Piégu, *C. R. Acad. sc.*, 1846, t. XXII, p. 682 et *Müller's Arch. für anat. Jahrgang.* 1847.

sion du niveau du liquide était à son maximum pendant l'inspiration, et l'élévation de ce même niveau à son maximum pendant l'expiration.

Le rapprochement de ces phénomènes et de ceux qui s'étaient offerts à Bourgougnon (1), dans ses expériences sur les mouvements du cerveau avec un tube *ouvert* vissé dans le crâne d'un animal, ne pouvait échapper au Dr Piégu; il a même particulièrement insisté, dans un travail complémentaire plus récent (2), sur l'identité admise par lui en 1846 des causes qui produisent des phénomènes identiques : au lieu d'attribuer les mouvements du cerveau à des soulèvements de la masse encéphalique par la dilatation des artères de la base, il les mit sur le compte de l'expansion vasculaire générale produite dans l'organe par l'afflux du sang artériel; l'affaissement de la pulpe cérébrale fut de même attribué au retrait consécutif des petits vaisseaux.

Nous ne suivrons pas M. Piégu dans les détails de cette assimilation *des doubles mouvements du cerveau aux doubles mouvements des membres*, l'expérience se compliquant des particularités relatives au liquide céphalo-rachidien : ce serait introduire une complication inutile dans notre exposé et sortir des conditions simples où nous nous plaçons.

En 1850 parut le travail de Chelius (3) dans lequel l'auteur annonçait qu'il avait vu les mouvements du pouls traduits par les oscillations d'une petite colonne d'eau dans un tube vertical qui surmontait un cylindre contenant l'extrémité d'un membre. Mais, comme le dit Mosso dans son mémoire dont nous parlerons bientôt, Chelius n'insista pas sur l'importance de cette méthode et ses recherches restèrent ignorées. Nous savons que le Dr Piégu avait déjà étudié les mêmes mouvements avec le même appareil, mais sa priorité n'atténue en rien le mérite de Chelius, car celui-ci ne connaissait évidemment point les recherches de notre compatriote, pas plus que les

(1) Bourgougnon, *Th. Paris*, 1839.

(2) Piégu, *Arch. phys.*, 1872.

(3) Chelius. — *Beitrage zur Vervolstandigung der Physikalischen Diagnostik.* — *Vierteljahrschrifft für die praktische Heilkunde, herausgegeben der Med. Facultat in Prag.* VII *Jahrgang*, 1850, XXII B., S. 103.

auteurs qui sont venus ensuite n'eurent connaissance des siennes.

Un détail important fut observé par Chelius le premier : il suspendit librement son appareil, et amoindrit ainsi l'influence des mouvements musculaires du membre et les effets des oscillations du corps sur les variations du niveau de la colonne liquide.

Mosso, ignorant ce détail des expériences de Chelius, eut la même idée, et appliqua très-heureusement à son *Pléthysmographe* un procédé de suspension analogue.

Jusqu'ici on s'était contenté de suivre du regard les déplacements du liquide dans le tube ouvert à l'air libre, et, avec cette méthode d'exploration, on ne pouvait voir que ce qu'on avait vu, c'est-à-dire que le niveau exécutait une grande ascension pendant l'expiration, une grande descente pendant l'inspiration, et que ces deux excursions très-amples se produisaient par petites saccades isochrones avec les battements du cœur (Piégu).

Mais la fixation de ces mouvements sur le papier ne pouvait manquer d'être bientôt tentée, car l'emploi des instruments enregistreurs, inauguré par le professeur Ludwig en 1847, commençait à prendre dans les recherches physiologiques le rang qu'il méritait.

Fick (1), quelques années après Chelius, ent reprit doncd'inscrire avec le kymographion les mouvements alternatifs de dilatation et de resserrement présentés par la main enfermée dans un appareil analogue à ceux qui ont été déjà indiqués. Les déplacements du liquide étaient transmis à un manomètre en U : le flotteur de la longue branche inscrivait sur la bande de papier se déroulant au-devant de la pointe les grandes oscillations respiratoires et les petites oscillations cardiaques du membre en expérience.

L'appareil de Fick offre déjà ce grand avantage que les changements de volume rapides du membre sont en totalité transmis au manomètre. La membrane de caoutchouc qui

(1) A. Fick. — *Untersuch. a. d. Zürcher physiol. Laborat.* I, p. 1. (Citation de Mosso.)

laisse passer l'avant-bras est, en effet, rendue fixe par l'addition d'une épaisse couche d'argile consolidée elle-même à l'aide d'une plaque métallique : il résulte de cette suppression des mouvements de l'obturateur que les moindres variations du volume de la main se traduisent par des oscillations correspondantes de la colonne manométrique.

Mosso remarque avec quelque raison que, l'appareil de Fick étant déposé sur une table et non point suspendu comme celui de Chelius et comme le sien, les petits mouvements du membre et du corps tout entier doivent se traduire aussi par des oscillations du liquide et viennent par conséquent compliquer le tracé en y introduisant des éléments étrangers aux changements du volume de l'organe.

J'accepte, pour l'appareil du professeur Fick, le reproche de Mosso, mais avec certaines réserves : on peut maintenir, en y apportant quelque soin, la main et l'avant-bras dans une immobilité complète pendant le temps que doit durer une de ces expériences ; de plus, les mouvements étrangers aux variations circulatoires, se traduisant sur le tracé par des soubresauts de la ligne, seraient toujours faciles à reconnaître.

Du reste, pour le but que s'était proposé Fick, cette petite complication ne me semble avoir qu'une bien faible importance : Fick ne s'est préoccupé que des changements de calibre des vaisseaux en rapport avec l'action rhythmique du cœur, et des grandes variations commandées par les mouvements respiratoires ; il n'a point cherché, à ma connaissance du moins, à apprécier les changements de volume ***absolus***, recherche dont s'est uniquement préoccupé Mosso.

Par conséquent, la fixité rigoureuse du membre n'avait pas pour le professeur Fick la même importance que pour Mosso.

Mais, au point de vue même où se plaçait l'expérimentateur, une autre objection plus grave me semble devoir être faite à son mode d'inscription lui-même : ***la vitesse acquise du liquide déforme les indications.*** Le tube du manomètre, cylindrique, forcément étroit, renferme une longue colonne liquide qui, projetée au moment de l'afflux du sang dans le membre, dépasse le point auquel elle devait s'arrêter, et ***vice versâ.***

Ces déformations du tracé, déjà défectueuses en elles-

mêmes, ne sont point comparables les unes aux autres dans une série de pulsations, puisque, d'après les mouvements respiratoires, celles-ci s'inscrivent sur des niveaux différents. Je fournirai tout à l'heure les preuves graphiques de quelques-uns des inconvénients qui résultent des oscillations propres du liquide enregistrées par la plume écrivante en même temps que les variations réelles du membre soumis à l'immersion. Si j'ai insisté quelque peu sur ce point, c'est que j'ai eu moi-même à lutter contre cette cause de déformation des tracés.

Le professeur Fick, disais-je tout à l'heure, s'est préoccupé spécialement d'étudier les variations rapides du volume de la main en rapport avec les mouvements du cœur et les variations plus lentes déterminées par le double mouvement respiratoire.

Mosso, dans ses recherches sur les changements de volume des organes, remontant à 1874 (1), a poursuivi un tout autre problème : il a voulu surtout inscrire les mouvements des vaisseaux indépendamment des oscillations rhythmiques dues à la double influence cardiaque et respiratoire. Ce sont donc spécialement les changements de volume absolus qu'il s'est attaché à déterminer. Pour cet ordre de recherches son appareil à déversement est excellent, d'une précision indiscutable ; la description en a été donnée par l'auteur dans un mémoire important (2), et je l'ai reproduite moi-même dans la *Revue des cours scientifiques* (3).

Je n'en rappellerai donc ici que les points principaux.

Dans un manchon de verre horizontalement placé sur une tablette librement suspendue, on introduit le membre supérieur jusqu'au-dessus du coude. Une forte membrane de caoutchouc ferme en haut l'appareil et s'oppose à l'écoulement de l'eau dont il est rempli.

De l'autre extrémité du cylindre sort un tube horizontal qui

(1) A. Mosso, *Von einige neuen Eigenschaften der Gefæsswand*.—Leipzig, 1874.

(2) A. Mosso.—*Movimenti dei vasi sanguigni nell' uomo. Ac. Sc. di Torino*. Nov. 1875.

(3) Cours de l'Université de Turin, *Revue scientifique*, mai 1876.

se coude ensuite à angle droit et plonge dans une éprouvette. Cette éprouvette se trouve équilibrée par une petite masse à laquelle elle est reliée par l'intermédiaire d'une poulie.

L'éprouvette, plongeant dans de l'eau alcoolisée, va s'enfoncer chaque fois que le volume du membre immergé dans le cylindre viendra à augmenter; elle émergera au contraire quand le volume du membre diminuera, et ce double mouvement d'abaissement et d'élévation de l'éprouvette, commandé par le déversement où la rentrée d'une quantité variable de l'eau du cylindre, commandera à son tour l'ascension ou la descente d'un contre-poids qui lui fait équilibre.

Mosso a adapté à ce contre-poids mobile dans le sens vertical une plume qui trace sur un cylindre tournant ou sur la bande du kymographion de Ludwig : *toute augmentation du volume du bras (c'est-à-dire toute dilatation vasculaire) s'accompagnera d'une ascension de la courbe ; toute diminution de volume (resserrement vasculaire), faisant remonter l'éprouvette, fera d'autant redescendre la masse écrivante.*

Le but principal poursuivi par Mosso est d'étudier les effets des mouvements propres des vaisseaux se produisant indépendamment des variations que leur imprime l'action rhythmée du cœur, et sous l'influence des propriétés inhérentes à leur tissu.

Or, c'est évidemment l'étude des variations produites par ces mouvements vasculaires dans la quantité du sang contenue dans le membre qui devait préoccuper l'auteur; il évalue ces modifications en comparant les hauteurs successives des ordonnées d'une courbe obtenue dans une expérience, sachant au préalable à quel volume d'eau déplacée correspond telle ou telle élévation de la courbe, et réciproquement quelle quantité d'eau a dû être soustraite à l'éprouvette flottante pour que la courbe s'abaisse de telle ou telle valeur.

Des expériences antérieures de circulation artificielle lui avaient permis de suivre les modifications qu'éprouvent les vaisseaux d'un organe isolé, sous l'influence d'une substance apportée dans cet organe par du sérum circulant sous une pression constante : ce sont des recherches du même ordre qu'il continue avec son pléthysmographe. Mais toute légitime que nous semble une pareille recherche, nous pen-

sons qu'on doit tout d'abord admettre une différence fondamentale entre les variations circulatoires certainement et uniquement *vasculaires* d'un organe isolé dans lequel la circulation se fait sous une charge constante, et celles d'un organe ou d'un segment de membre en rapport avec les autres régions vasculaires, pouvant subir comme le contre-coup des autres variations circulatoires produites dans les organes périphériques, pouvant surtout être subordonnées aux changements qui surviennent dans la *fonction cardiaque*.

Dans les cas si complexes de la circulation chez l'homme, l'appareil de Mosso ne peut fournir à lui tout seul une solution à l'abri de la discussion. Il est indispensable d'être fixé en même temps sur la manière dont fonctionne le cœur, s'il se ralentit ou se vide moins complétement, bref s'il envoie moins de sang à la périphérie quand diminue le volume du membre.

Cette notion essentielle ne nous paraît pouvoir être obtenue que par l'exploration de la pulsation du cœur.

Marey, rapprochant la cardiographie chez les animaux de l'exploration extérieure du cœur chez l'homme, a bien montré dans ses différentes publications l'importance de la ligne d'évacuation du tracé ventriculaire, ligne dont l'inclinaison plus ou moins accusée correspond à une diminution de volume, à une déplétion du cœur plus ou moins rapide.

L'exploration de la pulsation du cœur nous paraît donc nécessaire pour établir, autant que possible, les rapports qui relient les variations de volume d'un organe ou d'une portion de membre aux changements survenus dans la fonction cardiaque.

Par exemple dans ses recherches sur les effets du froid appliqué à une main sur la circulation de la main opposée, Mosso eût avantageusement inscrit les courbes cardiaques en même temps que les changements de volume du membre supérieur. L'influence réflexe du froid peut en effet modifier primitivement le jeu du cœur, du moins doit-on apporter la preuve que telle n'est point son action initiale, quand on présente la diminution de volume comme primitivement vasculaire.

Mais, en revanche, dans tous les cas où Mosso a exécuté des

recherches surtout ou purement mécaniques (compressions veineuses, compressions artérielles), les indications qu'il a obtenues sont des plus nettes : la distension des vaisseaux par l'accumulation du sang veineux, leur affaissement par la suppression de l'afflux artériel, etc., se lisent nettement sur ses tracés. Il en est de même du resserrement vasculaire déterminé par l'excitation faradique.

Nous verrons tout à l'heure cependant que l'on peut aller plus loin dans l'analyse d'un grand nombre de phénomènes dont les recherches de Mosso donnent le sens général avec une parfaite précision, mais ne peuvent fournir, vu la lenteur des indications du pléthysmographe, les détails minutieux.

J'ai indiqué, dans l'exposé comparatif des recherches de Fick et de celles de Mosso, la différence essentielle qui devait être établie entre elles : Fick inscrivait exclusivement les variations rapides du volume de la main en rapport avec les pulsations artérielles; Mosso s'est préoccupé de l'inscription et de l'évaluation des changements déterminés dans le volume de la main et de l'avant-bras par les modifications de calibre des vaisseaux sanguins; il a étudié ces variations comme subordonnées aux mouvements propres des vaisseaux, indépendamment de l'action rhythmée du cœur.

Le travail que j'ai exécuté de mon côté représente à la fois les deux ordres de recherches précédentes : comme Fick, j'ai inscrit les changements du volume de la main subordonnés à l'influence cardiaque, c'est-à-dire le résultat des *pulsations* du tissu vasculaire; comme Mosso, je me suis attaché à l'étude des changements de volume absolus, me préoccupant dans mes expériences du niveau des moyennes des courbes obtenues par rapport à l'abscisse.

Le travail du professeur Fick et celui de Chelius m'étaient alors inconnus, et c'est de mon ami Mosso que j'en ai appris l'existence au mois d'août 1875, mes recherches ayant été entreprises au mois de mars de la même année; j'ai encore eu à cette époque seulement connaissance des recherches de Mosso lui-même, recherches dont l'intérêt m'a engagé à poursuivre comparativement les miennes.

L'appareil dont j'ai fait usage n'est autre que celui que

Charles Buisson signala en 1862 (1) dans sa thèse inaugurale.

On sait que Buisson avait enregistré les battements du cœur en appliquant sur la région de la pointe la circonférence d'un entonnoir rempli d'air et communiquant, par un tube de caoutchouc également plein d'air, avec un second entonnoir semblable. Sur la membrane de celui-ci reposait un levier inscripteur.

« Si l'on remplace, dit-il, l'entonnoir explorateur par un bocal rempli d'eau dans lequel on plonge la main, on peut transmettre à distance, au moyen d'un tube vertical, les oscillations de l'eau du bocal. »

Voilà ce qu'on savait des recherches de Buisson quand le professeur Marey m'a engagé à les reprendre et à en étendre l'application.

Charles Buisson avait transformé en appareil inscripteur l'appareil à l'aide duquel Piégu avait constaté le premier les doubles mouvements d'expansion et de resserrement des membres.

J'ai à mon tour adopté le même appareil en y ajoutant quelques modifications :

Les oscillations produites dans le niveau du liquide ont été inscrites à distance, avec tous leurs détails, à l'aide de la transmission par l'air en coiffant le tube vertical du bocal avec un tube de caoutchouc qui aboutissait à un tambour à levier inscripteur de Marey.

Les modifications que j'ai apportées à l'appareil ont eu pour but de prévenir quelques causes d'erreur :

1° Les oscillations de la membrane de caoutchouc à travers laquelle est engagé l'avant-bras ont été supprimées (2).

(1) Ch. Buisson, *Th. Paris*, 1862.

(2) J'ai déprimé la plaque de caoutchouc avec un disque épais de gutta-percha fixé lui-même par une forte traverse en cuivre qu'assujettit au bocal un collier métallique à charnière. De cette façon, les déplacements du liquide dans l'intérieur du bocal se traduisent en totalité par les changements du niveau de la colonne d'eau dans le tube vertical, les oscillations de la membrane étant rendues impossibles.

2° Les oscillations propres du liquide déplacé dans le tube vertical ont été évitées avec soin (1).

J'ai supprimé cette combinaison d'oscillations étrangères aux mouvements réels en me servant d'un tube d'assez fort calibre muni, au voisinage du bocal, d'une ampoule qui éteint les effets de la vitesse acquise, en permettant au liquide de s'étaler en surface.

Le tracé suivant, recueilli dans ces conditions nouvelles, me présente une garantie complète à cause de son identité avec le tracé du pouls, point sur lequel j'insisterai plus tard :

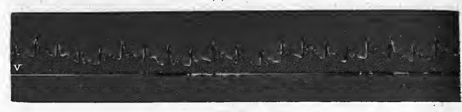


Fig. 2. — Tracé des changements du volume de la main avec un appareil dans lequel sont supprimées les oscillations propres de la colonne liquide.

3° Le membre a été maintenu dans un état de fixité aussi complète que possible (2).

(1) Ces oscillations m'avaient donné, au début de mes recherches, quand j'employais un tube étroit, également calibré, des tracés déformés par des ondulations multiples dans la ligne de descente de la pulsation ; j'obtenais ainsi la courbe suivante :

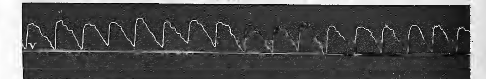


Fig 1. — Tracé des changements du volume de la main obtenu avec un appareil à colonne oscillante étroite et longue.

(2) Cette fixité du membre peut être obtenue le plus sûrement et le plus commodément par la suspension de l'appareil, de préférence à l'aide d'un fort lien élastique. J'emploierai désormais ce procédé dont l'efficacité m'est aujourd'hui démontrée ; mais dans toutes mes expériences je n'en ai point fait usage. Mon appareil incliné était soutenu latéralement, mon coude s'appuyait sur une tablette, et ma main saisissait dans le bocal une barre de bois arrondie. J'obtenais ainsi une immobilité suffisante pour avoir des tracés purs de toute secousse musculaire, et, quand par hasard un petit mouvement se produisait, je le reconnaissais à un brusque ressaut du graphique.

L'appareil ainsi modifié est représenté dans la figure suivante (fig. 3) :

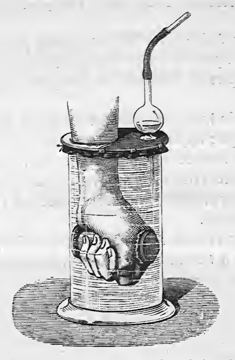


Fig. 3. — Appareil explorateur des changements du volume de la main. — La membrane au travers de laquelle passe l'avant-bras est immobilisée par une plaque métallique ; dans le tube vertical muni d'une ampoule, s'opèrent les changements de niveau qui s'inscrivent à distance à l'aide de la transmission par l'air.

On comprend facilement, en comparant les graphiques 1 et 2, pourquoi j'ai aussi longuement discuté la valeur des indications qu'a pu obtenir le professeur Fick avec un manomètre inscripteur à colonne oscillante.

L'inscription des changements du volume de la main au moyen de la transmission par l'air offre, en outre de la fidélité avec laquelle sont enregistrés les moindres détails des mouvements explorés, cet avantage considérable qu'on peut inscrire *simultanément*, par le même moyen, la *pulsation du cœur*, les *mouvements respiratoires*, le *pouls de telle ou telle artère*, etc.

La superposition de ces différentes courbes permet d'apprécier les rapports qu'ont entre eux les phénomènes enregistrés en même temps ; on verra, dans le chapitre suivant, l'application de ce procédé d'étude.

Indications fournies par l'appareil. — Comparaison des doubles mouvements de la main et du pouls radial.

On voit, d'après le tracé n°2, que la main présente un double mouvement d'expansion et de retrait accusé par la ligne d'ascension et la ligne de descente de chaque ondulation du graphique.

Dès l'abord, le tracé rappelle exactement celui que fournit le sphygmographe appliqué sur la radiale : c'est qu'en effet on recueille la somme des dilatations et resserrements des vaisseaux contenus dans la main, les dilatations correspondant à l'afflux du sang artériel, les resserrements à l'écoulement du sang par les veines.

Ces indications intermittentes *sont contrôlées par le tracé du sphygmographe à transmission* (1) recueilli simultanément sur la radiale du côté opposé à celui dont on explore les changements de volume; et, à leur tour, *elles peuvent servir de moyen de vérification du sphygmographe.*

Pour simplifier l'étude des indications fournies par l'appareil à changements de volume, et pour faciliter leur comparaison avec les tracés sphygmographiques, je reproduis (fig. 4) les tracés simultanés des doubles mouvements de la main et de la



Fig. 4. — Tracés des pulsations du cœur (ligne C) et des changements du volume de la main (ligne V) recueillis simultanément. Repères indiquant les rapports des pulsations de la main et des pulsations du cœur.

(1) V. Marey. Trav. du laboratoire, 1875. Mémoire sur la pression et la vitesse du sang. (Description du sphygmographe à transmission.)

pulsation cardiaque et (fig. 5) les tracés simultanés du pouls radial et de la pulsation cardiaque.

Du rapprochement de ces courbes résultera la preuve que *les doubles mouvements de la main, affectant avec la fonction cardiaque les mêmes rapports que le pouls d'une seule artère, doivent être considérés comme l'expression des pulsations totalisées des vaisseaux de la main.*

Dans la figure 4 et dans la figure 5 les plumes des leviers inscripteurs étaient disposées exactement sur une même ligne verticale, et à l'aide des repères verticaux, il est facile d'établir le rapport dans le temps des deux phénomènes cardiaque et vasculaire. Si le début de la systole cardiaque et le début de l'expansion vasculaire de la main (fig. 4) étaient synchrones, nous verrions ces deux débuts sur la même verticale.

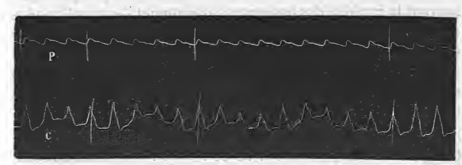


Fig. 5. — Tracé des pulsations du cœur (ligne C) et du pouls radial (sphygmographe à transmission, ligne P), recueillis simultanément.— Lignes de repère.

Mais l'expansion de la main provoquée par l'afflux du sang dans les artères et accusée par la ligne ascendante de chaque pulsation, retarde un peu *sur le début de la systole ventriculaire*; l'origine de la pulsation de la main se trouve dès lors reportée un peu en deçà du repère vertical correspondant au début de la systole ventriculaire.

Pour apprécier exactement la valeur de ce retard, on prend au compas la distance qui sépare le repère correspondant au début de la systole cardiaque de l'origine d'une expansion de la main, et, reportant cette longueur sur le tracé du diapason inscrit comme d'habitude, on trouve qu'elle représente $\frac{15}{100}$ de seconde pour le tracé que nous avons sous les yeux.

Examinons maintenant au même point de vue la figure 5 qui

représente le pouls radial recueilli avec le sphygmographe à transmission, en même temps que la pulsation cardiaque. En évaluant de la même manière que tout à l'heure le retard de la pulsation radiale sur le début de la systole ventriculaire, nous le trouvons ici encore équivalent à $\frac{15}{100}$ de seconde. Les deux phénomènes *pulsation du tissu vasculaire de la main* et *pulsation d'une seule artère* (*la radiale*), affectent donc avec la fonction cardiaque les mêmes rapports dans le temps, et ce rapprochement suffirait déjà pour établir la commune origine de ces deux ordres de pulsations.

Le fait ressortira plus nettement encore de l'observation suivante.

Le retard du pouls sur la systole cardiaque n'a pas une valeur constante. Suivant l'état de la circulation périphérique, suivant la rapidité des battements du cœur et l'évacuation plus ou moins facile du ventricule, il varie de quelques centièmes de seconde. Or *le retard de l'expansion vasculaire de la main varie parallèlement*. Ainsi j'ai recueilli des tracés comparatifs dans des conditions d'évacuation du cœur différentes, et j'ai vu le retard augmenté pour la pulsation cardiaque et pour l'expansion de la main quand le cœur se vidait difficilement : de $\frac{15}{100}$ de seconde, la valeur de ce retard s'est élevée souvent à $\frac{20}{100}$ de part et d'autre.

L'interprétation du phénomène nous est fournie par la notion du temps nécessaire au transport de l'onde, de son point de départ, le cœur gauche, à l'extrémité du membre supérieur. L'expansion post-systolique de toute une masse vasculaire et la dilatation post-systolique d'une seule artère sont en effet absolument comparables : phénomènes déterminés par une même cause, ils se produisent avec un synchronisme évident quand le tissu et l'artère qu'on explore sont tous deux à une égale distance du cœur.

Plus rigoureusement, on pourrait dire que l'augmentation brusque de la pression qui constitue le pouls *d'une artère*, est de tous points semblable à l'augmentation brusque de la pression dans le tissu de la main considéré comme *un grand sphygmoscope*. On sait que chez les animaux l'exploration de

la pression artérielle s'opère souvent à l'aide de cet instrument (Marey, Chauveau, Lortet), dans lequel l'afflux du sang détermine la dilatation d'un doigt de gant en caoutchouc et refoule l'air du manchon de verre qui contient la poche extensible.

Dans nos expériences, la main représente le sphygmoscope, et l'on explore ses changements de volume par le déplacement de l'eau du manchon. Il en résulte qu'en définitive ce sont les variations de la pression dans cette main qui déterminent ses changements de volume en rapport avec l'action cardiaque; de plus, les variations qui portent sur la ligne d'ensemble sont liées aux changements réciproques de la pression artérielle et de la pression veineuse.

Interprétation des différents éléments contenus dans les courbes des changements du volume de la main ; leur comparaison avec les tracés du sphygmographe à transmission.

Chaque systole cardiaque est suivie d'une expansion plus ou moins brusque de toute la masse vasculaire de la main : ces afflux du sang dans les vaisseaux artériels de tout calibre s'accusent sur le tracé par la ligne ascensionnelle, comme dans le tracé du pouls d'une seule artère l'augmentation brusque de la pression dans cette artère s'annonce par l'élévation du levier inscripteur.

Dans l'intervalle de deux afflux se produit l'écoulement du sang par les vaisseaux veineux, d'où la diminution du volume de la main accusée par la ligne descendante de la courbe, laquelle répond dans le tracé du pouls à la descente du levier déterminée par la diminution de pression dans l'artère explorée.

Entre la ligne ascendante et la ligne descendante se voit le sommet de la courbe dont la forme est plus ou moins aiguë ou arrondie suivant que le retrait des vaisseaux de la main s'opère plus ou moins rapidement ; de même la forme du som-

met de la pulsation d'une seule artère varie avec l'état de la pression dans le système artériel, condition qui permet un afflux facile ou difficile, suivant que l'écoulement capillaire est abondant ou limité.

La connaissance aujourd'hui bien précise des différents éléments que présente la courbe sphygmographique me dispense d'insister sur chacune des particularités que présente la courbe des changements du volume de la main recueillie dans les conditions de circulation normale.

Il est un détail cependant dont les recherches de Marey ont mis en relief la valeur à propos du pouls artériel, et dont je tiens à bien indiquer la présence dans les tracés des changements de volume : c'est le *dicrotisme* simple ou double toujours constant sur la ligne de descente. S'il avait pu rester un doute au sujet de la réalité du dicrotisme dans une artère explorée au sphygmographe, je crois que la présence de ce redoublement sur les tracés des changements du volume de la main suffirait à lever toute hésitation, car évidemment le ressaut de la ligne de descente ne peut ici être considéré comme un phénomène indépendant de la circulation elle-même et dû à une oscillation propre du levier enregistreur.

Le *dicrotisme* que nous observons dans la période de retrait du tissu vasculaire constitue un phénomène identique au dicrotisme de la pulsation radiale ; comme ce dernier, il est dû à une onde liquide réfléchie du centre à la périphérie, à une onde positive de deuxième ordre, l'onde positive de premier ordre étant représentée par la grande ligne ascensionnelle du début de la pulsation de la main (1).

Évaluation des changements du volume de la main. — Graduation de l'appareil.

Pour obtenir l'évaluation des changements du volume de la main dans les différentes conditions de l'exploration, j'ai eu

(1) Marey, *Mouvement des ondes liquides*. Travaux du laboratoire, Paris, G. Masson, 1875.

recours à la graduation de l'appareil en opérant de la façon suivante :

1° Je ferme complétement l'orifice supérieur du bocal par une membrane de caoutchouc tendue que je fixe avec une lame métallique résistante, de façon à en supprimer tout soulèvement.

Le tube d'exploration ordinaire, muni de son ampoule, est mis en communication avec un levier inscripteur, et, dans ces conditions, le niveau de l'eau à la partie inférieure de l'ampoule restant constant, la plume du tambour enregistreur trace une ligne horizontale, abscisse à laquelle je rapporterai toutes les variations soit positives soit négatives, que j'aurai à déterminer.

Par un petit orifice latéral, j'introduis la canule d'une seringue graduée et je pousse dans le bocal un centimètre cube d'eau; la plume s'élève jusqu'à un point qui représente l'élévation du niveau du liquide dans l'ampoule quand on ajoute un centimètre cube d'eau au contenu du bocal.

Je déplace un peu le cylindre, et ma plume trace une seconde ligne horizontale parallèle à la première, dont elle est distante de toute la hauteur de l'arc de cercle décrit sous l'influence de l'addition du premier centimètre cube d'eau.

J'en introduis un second : nouvelle déviation de la plume, nouveau point dont l'élévation au-dessus de l'abscisse commune correspond à l'addition de deux centimètres cubes d'eau.

Le cylindre étant de nouveau déplacé, je recommence la poussée d'un certain nombre de centimètres cubes, et j'obtiens ainsi un escalier dont les degrés diminuent graduellement de hauteur, à mesure que la membrane du tambour, dans lequel l'air est de plus en plus comprimé, devient moins extensible. Ma plume passe donc par une série de points qui correspondent à des additions de plus en plus considérables de liquide dans l'appareil, et en joignant tous ces points j'obtiens une courbe sur le cylindre tournant. Cette courbe représente une série de valeurs connues; et, en la reportant sur les courbes des expériences faites pendant que la main plonge dans l'appareil, je puis être fixé sur la signification de ces courbes au point de vue de l'évaluation des changements de volume.

2° Pour me rapprocher davantage des conditions de l'expérience ordinaire, je répète la graduation de l'appareil en y plongeant la main. J'ai soin de me mettre à l'abri des variations qui pourraient tenir à la circulation elle-même en comprimant l'humérale de façon à empêcher l'afflux de sang dans la main, et en liant circulairement mon bras pour que le sang coutenu dans les régions immergées ne puisse être chassé par l'augmentation de la pression à leur surface quand j'ajoute de l'eau au contenu du bocal.

Cette seconde épreuve me donne les mêmes résultats que la première, ce qui doit être, puisque l'introduction de la main et de l'avant-bras incompressibles comme le liquide lui-même, ne modifie nullement les conditions de l'expérience.

Ayant ainsi obtenu la courbe des augmentations de volume, il était facile d'inscrire la série inverse en aspirant successivement les centimètres cubes d'eau préalablement poussés dans l'appareil. Cette courbe descendante fait du reste pendant à la première ; le retour sur l'abscisse est constant, ce qui prouve en faveur de la parfaite élasticité de l'appareil inscripteur.

Je pourrai évaluer ainsi en centimètres et fractions de centimètres cubes les courbes d'augmentation de volume obtenues dans les expériences que j'aurai tout à l'heure à détailler; mais il m'était tout aussi nécessaire de connaître les valeurs négatives, c'est-à-dire d'être à même d'apprécier la quantité de sang que j'enlève de ma main ou que j'empêche d'y arriver dans telle ou telle expérience.

Il m'a suffi pour cela d'aspirer avec la seringue graduée des quantités d'eau connues ; mais la graduation de l'échelle négative n'a pu être poussée aussi loin que la graduation de l'échelle positive à cause de la disposition de l'ampoule au voisinage immédiat du bocal.

Il est inutile de reproduire ici ces différentes courbes puisqu'elles ne sont valables que pour un appareil composé d'une série de pièces toujours les mêmes.

SECONDE PARTIE.

Expériences.

Nous sommes en mesure maintenant d'aborder la partie expérimentale de notre sujet, ayant assez longuement étudié le fonctionnement des appareils et les indications qu'ils fournissent à l'état de repos, c'est-à-dire en dehors de toute influence étrangère au jeu normal des fonctions cardiaque et respiratoire.

Cette seconde partie comprendra l'étude des trois groupes de phénomènes provoqués soit en agissant directement sur la circulation du membre par des actions toutes *mécaniques* (comme les compressions artérielles ou veineuses), soit en modifiant cette circulation par des influences *vasculaires moins directes* (comme l'action du froid, des courants électriques), soit enfin en *faisant varier* dans un sens déterminé la *fonction respiratoire.*

Ces trois groupes de phénomènes se présentent donc à l'étude dans l'ordre suivant :

1° Phénomènes circulatoires déterminés par des *influences mécaniques.*

2° Phénomènes circulatoires déterminés par des *influences nerveuses directes ou réflexes.*

3° Phénomènes circulatoires déterminés par des *variations de la respiration.*

I. — Phénomènes d'ordre mécanique.

A. — *Effets de la compression artérielle.*

La main et l'avant-bras étant plongés dans l'appareil à déplacement, le tracé des changements du volume de ces régions s'inscrit sur une ligne sensiblement horizontale.

A un certain moment de l'expérience, je comprime sans secousse, avec le bout du doigt de la main restée libre, l'artère humérale au pli du coude.

Quand l'effacement de l'artère est complet, la voie d'afflux principal étant interrompue, le sang n'arrive plus que par des voies collatérales étroites, et la partie du membre immergé se vide, par les veines restées libres, du sang qu'elle contenait. Aussi voit-on à partir du point C (fig. 6) les pulsations disparaître de la ligne du tracé, et cette ligne s'abaisser graduellement jusqu'à un niveau qui représente la diminution de volume maximum : ce niveau reste à peu près constant jusqu'à ce qu'on cesse en C' la compression de l'humérale.

Avant d'insister sur les phénomènes qui suivent cette compression, je tiens à noter quelques-unes des particularités qui se produisent pendant que la source d'afflux principale est supprimée :

La ligne d'évacuation, de C en C', présente quelques sinuosités qui indiquent que la main reçoit encore un peu de sang. C'est qu'en effet, au-dessus du point comprimé, l'artère humérale fournit deux collatérales importantes, l'humérale profonde et la collatérale interne.

Ces deux branches s'anastomosent sur les deux côtés de la région du coude, avec les récurrentes radiales et cubitales, et forment un cercle anastomotique suffisant, même dès les premiers instants de la compression, pour ramener une petite quantité de sang dans les parties qui n'en reçoivent plus par la voie principale.

Mais cet afflux artériel n'est que de minime importance eu égard à la facilité de l'écoulement veineux. Ce n'est dès lors

que dans le cours d'une expérience prolongée qu'on peut noter une légère tendance au redressement de la ligne d'évacuation, les voies d'afflux collatéral étant seulement alors dilatées de façon à laisser arriver une assez notable quantité de sang qui détermine une certaine augmentation du volume de la main.

Cette arrivée du sang par des voies collatérales a été complétement supprimée dans d'autres expériences où au lieu de comprimer l'humérale au pli du coude, j'ai comprimé l'axillaire : la dilatation des collatérales se fût certainement produite si l'expérience eût été assez longtemps prolongée, et nos expériences nous eussent permis d'apprécier les petites variations graduelles du volume de la main dans ces conditions, si nous avions pu nous soumettre à un examen suffisant.

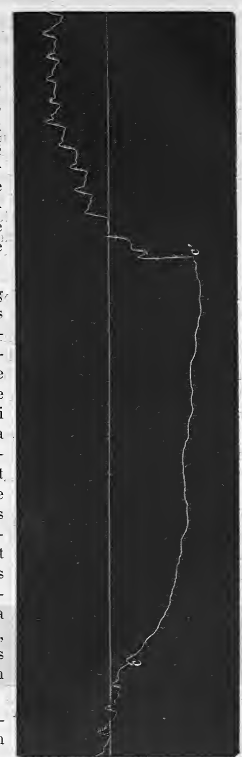


Fig. 6. — Diminution du volume de la main et suppression des pulsations par la compression de l'artère humérale au pli du coude (en C). — Décompression en C'.

Pour revenir à l'expérience de la compression de l'humérale, exami-

nons les phénomènes qui se présentent quand on cesse cette compression.

Dans la figure 6, on voit qu'en C' le doigt a été soulevé, et, la décompression coïncidant précisément avec l'afflux d'une ondée artérielle, le volume de la main se relève brusquement et atteint, du fait de cette première ondée, un volume assez considérable.

Les ondées suivantes continuent à élever le niveau des variations de volume, et, distendant tout le réseau de la main et de l'avant-bras, y produisent une augmentation de volume plus grande *qui dépasse le niveau du début.*

Ce phénomène, également constaté par Mosso, persiste après la cessation de la compression une demi-minute environ; après ce temps la main revient à son volume primitif.

A quoi tient cette distension exagérée? les vaisseaux artériels affaissés pendant la compression se sont évidemment laissés distendre plus que de coutume par le sang qu'ils recevaient; cette dilatation excessive semble avoir sa cause dans le défaut de tonicité des parois artérielles, soustraites pendant quelques instants à la pression intérieure à laquelle elles se retrouvent brusquement soumises après la cessation de la compression.

Peut-être faut-il admettre ici, avec Mosso, un véritable trouble nutritif des parois des vaisseaux déterminé par l'accumulation des matériaux de déchet insuffisamment entraînés par les veines?

Ce qui s'observe pendant la compression de l'humérale, quand on explore les changements du volume de la main se retrouve quand on inscrit le pouls radial tout seul avec le sphygmographe à transmission.

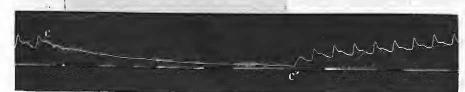


Fig. 7. — Disparition des pulsations et affaissement de l'artère radiale pendant la compression de l'humérale, de C en C'.

On voit dans la figure ci-dessus les pulsations de l'artère ra-

diale supprimées à partir du point C, qui correspond au moment où commence la compression de l'humérale : la pression baisse dans l'artère explorée à mesure qu'elle se vide dans les veines, et toute variation de pression disparaît, l'afflux étant supprimé.

B. — *Compression veineuse.*

Nous avons obtenu, dans les expériences précédentes, la diminution du volume du membre par la compression de l'artère principale. Nous allons maintenant voir l'effet inverse produit par la compression des veines, les artères restant libres, et nous pourrons suivre les phases du phénomène grâce aux nombreux détails fournis par les tracés.

L'appareil étant disposé comme il a été dit précédemment, les oscillations alternatives de la colonne liquide mettent en mouvement le levier inscripteur, et je recueille, au début de la ligne, quelques pulsations dont le niveau me servira plus tard de terme de comparaison.

Au point C de chacun des deux tracés de la figure suivante, on serre progressivement un lien placé au-dessus du pli du coude comme pour l'opération de la saignée.

La compression circulaire est assez énergique pour rendre impossible l'écoulement veineux, pas assez pour empêcher le sang d'affluer par les artères. Après avoir été maintenue le temps jugé nécessaire, la compression est brusquement suspendue, ou au contraire graduellement relâchée : ces deux cas sont représentés dans la figure 8.

Nous avons à examiner les modifications survenues dans la circulation de la région immergée : 1° *pendant la compression ;* 2° *après la compression.*

1° Pendant que la compression se produit par la constriction graduelle du lien circulaire, les veines émettent une quantité de sang de plus en plus faible jusqu'à ce que le retour du sang soit complétement entravé. A mesure que s'opère cette compression, on voit le volume de la main augmenter par saccades correspondant aux afflux artériels. Chacune de ces augmentations

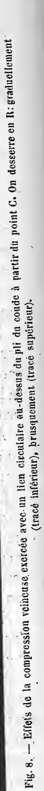


Fig. 8. — Effets de la compression veineuse exercée avec un lien circulaire au-dessus du pli du coude à partir du point C. On desserre en R : graduellement (tracé inférieur), brusquement (tracé supérieur).

successives, du volume de la main, devient de moins en moins importante. Cela tient à ce que le sang qui arrive par l'artère, trouvant dans le membre une pression toujours croissante, y pénètre de moins en moins abondamment.

Les premières pulsations ont une plus grande amplitude qu'à l'état normal, parce que l'afflux n'est pas compensé par l'écoulement, et, si plus tard nous voyons diminuer l'amplitude des variations de cause cardiaque, c'est certainement parce que la pénétration du sang dans le membre se réduit de plus en plus.

Les pulsations du début présentent encore un dicrotisme très-prononcé, preuve assurée que le liquide sanguin, pénétrant alors avec une facilité relative, la colonne liquide progresse encore avec vitesse ; mais peu à peu cette pénétration diminue, et son extinction graduelle est en rapport avec l'augmentation croissante de la pression déterminée par la compression veineuse.

Dans les premiers instants, lorsque la pression s'est élevée, elle se maintient à un même degré, traduit par l'horizontalité de la ligne qui correspond à la phase d'écoulement dans ses échelons successifs : à cette période, en effet, la pression du sang dans les régions situées au-dessous de la ligature veineuse, est insuffisante pour produire un réflexe pendant la seconde phase de la pulsation.

Ici se présente une question d'un grand intérêt, et qui méritera d'être reprise avec détails dans les recherches sur la pression artérielle. J'en signalerai seulement le sens, ne voulant point m'écarter du sujet de ce travail.

Quand on a poussé assez loin la compression veineuse pour arriver à la suppression complète de l'écoulement, on voit que les pulsations disparaissent complétement sur le tracé et que le volume du membre n'augmente plus. On est tout de suite porté à penser que cette suppression des variations d'origine cardiaque et cette stabilité du volume de la main dépendent de ce que les régions explorées ne reçoivent plus de sang. Or, pour que cet effet se produise, il faut évidemment que la pression du sang emprisonné dans le membre par la ligature veineuse *fasse équilibre à la pression absolue du sang dans le*

système artériel (pression désignée d'habitude sous le nom de pression constante).

Si nous pouvons déterminer à ce moment la valeur manométrique de la pression sanguine dans la main, cette valeur étant nécessairement égale à celle de la pression artérielle, nous aurons du même coup déterminé cette dernière (1).

Ce sujet doit être suivi par le professeur Marey lui-même. Je me contente donc de mentionner en passant l'importance de ce moyen nouveau d'évaluer la pression artérielle chez l'homme.

2° Les phénomènes qui suivent la décompression sont différents suivant qu'on relâche d'un seul coup le lien constricteur ou qu'on le desserre graduellement.

On voit dans le premier cas (fig. 8, ligne supérieure) avec quelle rapidité s'opère le dégonflement de la région : la grande élévation de la pression dont je parlais tout à l'heure détermine une évacuation veineuse considérable, et les veines de la racine du membre, ne présentant qu'une très-faible pression, reçoivent, du fait de cette différence énorme, une grande quantité de sang en un instant très-court.

Mais, pour être rapide, ce dégonflement de la main n'est pas complet : le membre conserve, après qu'on a desserré la ligature, un volume supérieur à celui qu'il présentait avant la compression.

Pourquoi cette persistance d'un certain degré de turgescence quand les voies veineuses sont redevenues perméables ? Il semble qu'on peut s'en rendre compte en admettant que les petits vaisseaux, soumis pendant la durée de la compression à une distension extrême, conservent un calibre supérieur à leur calibre normal, et ne se débarrassent plus dès lors de leur contenu avec la facilité ordinaire.

(1) On pouvait supposer qu'à cette période extrême où le tracé du volume de la main ne présente plus de pulsations, l'absence de toute oscillation était due à une tension exagérée de la membrane du tambour à levier inscripteur. Pour vérifier le fait, j'ai donné issue à une certaine quantité d'air par le tube de transmission, et, ayant ainsi rendu toute liberté à la membrane du tambour inscripteur, j'ai constaté que, malgré sa mobilité, elle ne transmettait plus d'oscillations à la plume inscrivante. De là cette conclusion : qu'*en effet, le membre exploré ne présente plus d'oscillations*, ne reçoit plus de sang, et que la pression y est égale à la pression du sang contenu dans les artères.

Cette dilatation persistante serait due à la fatigue des muscles vasculaires, à une perte momentanée de leur tonicité normale.

Peut-être pourrait-on encore invoquer, pour expliquer cet affaiblissement du tonus vasculaire, l'accumulation même des matériaux de déchet pendant la durée de la compression. C'est l'hypothèse proposée par Mosso pour expliquer la dilatation vasculaire persistant quelque temps après la compression de l'artère humérale.

Dans le cas de décompression veineuse *graduelle*, la chute est moins brusque et s'opère par saccades (fig. 8, ligne inférieure, à partir du point R). Ce phénomène s'explique de lui-même, puisqu'on modère l'écoulement veineux en n'enlevant que par degrés l'obstacle qui lui était opposé. L'évacuation étant moins facile et moins rapide que dans le cas de décompression subite, le membre continue à recevoir, pendant tout le temps que dure la décompression, une quantité de sang plus grande que celle qu'il peut encore émettre.

Dans tous les cas, le dégonflement de la main est surtout rapide, comme on devait s'y attendre, quand le relâchement de la ligature coïncide avec une *inspiration*. A ce moment, en effet, l'appel du sang veineux vers la poitrine s'ajoute aux autres causes que j'indiquais, et contribue naturellement à faire diminuer le volume du membre.

C. — *Effet de la compression des artères du membre inférieur sur le volume de la main.*

La suppression d'un département vasculaire important, comme celui des membres inférieurs, provoque nécessairement l'accumulation d'une plus grande quantité de sang dans les tissus dont les vaisseaux restent perméables, et la main subit, comme les autres régions, un accroissement de volume.

La figure suivante en fournit la preuve :

A l'instant C, un aide comprime les deux artères fémorales.

Il exerce soigneusement la compression avec le bout d'un

Fig. 9. — Effet de la compression des deux artères fémorales sur le volume de la main. On comprime en C : le volume de la main ne commence à augmenter que 6 ou 7 secondes plus tard.

seul doigt, et seulement d'avant en arrière pour être sûr de ne comprimer que l'artère et de laisser la veine fémorale complétement perméable.

On voit au bout de quelques instants la ligne d'ensemble du tracé commencer à s'élever : le volume de la main augmente donc d'une façon incontestable. Mais cette augmentation de volume est nécessairement modérée, car le sang qui trouve un obstacle à son écoulement dans les membres inférieurs doit se répartir entre toutes les autres régions, et la main ne recevra pour sa part qu'une faible partie de la masse sanguine retenue en amont des points comprimés.

La cause de l'augmentation du volume de la main à la suite de la compression des fémorales n'est point douteuse, puisque le phénomène disparaît quand on vient à cesser la compression.

Il n'y a pas, du reste, que l'occlusion des *artères* fémorales à invoquer pour expliquer le fait de l'augmentation du volume de la main à la suite de la compression.

En effet, si cette suppression de deux voies importantes d'écoulement pour le sang artériel, joue un grand rôle dans le gonflement observé du côté des organes restés perméables, il faut de plus compter avec l'évacuation graduelle du sang veineux des membres inférieurs.

Le déversement de ce sang dans la circulation générale vient augmenter la quantité de liquide à répartir entre les différents tissus.

Il y a donc deux phases, deux périodes

théoriquement distinctes dans le phénomène consécutif à la compression des artères fémorales; mais, à l'exploration des changements du volume de la main, ces deux périodes sont nécessairement confondues en un seul phénomène, l'augmentation de volume qui en est la résultante.

Comme réciproque, on peut s'assurer que le retour à la perméabilité des réseaux artériels des membres inférieurs, détournant une quantité notable du sang contenu dans les autres vaisseaux, amène dans le membre supérieur exploré une rapide diminution de volume.

Je noterai même, qu'après la cessation de la compression fémorale, le volume de la main tombe au-dessous de la valeur qu'il présentait au début de l'expérience. Il semble que les vaisseaux des membres inférieurs admettent, après avoir été quelque temps soustraits à la circulation, une plus grande quantité de sang que d'habitude.

Ce fait, du reste, n'a rien qui puisse surprendre, quand on le rapproche du phénomène analogue constaté pour les vaisseaux du membre supérieur.

Nous avons vu déjà, en effet, qu'après la compression de l'artère humérale, les vaisseaux de la main restent quelque temps plus dilatés qu'auparavant.

D. *Effet de l'appel du sang dans un membre inférieur par la ventouse Junod.*

Quand on enferme un membre inférieur dans la botte de Junod, et qu'après avoir recueilli quelques instants les variations normales du volume de la main, on raréfie rapidement l'air contenu dans la ventouse, on voit la ligne d'ensemble des pulsations de la main s'abaisser considérablement (fig. 10).

Cette dérivation considérable et rapide détermine, du côté des autres organes, des phénomènes d'anémie de tous points comparables à ceux que nous observons à la main : la pâleur de la face, le vertige, etc., témoignent de l'anémie céphalique, tout comme la diminution du volume de la main témoigne de la moindre quantité de sang reçue dans ses vaisseaux.

La rentrée de l'air dans la botte ne s'opérant que lentement,

Fig. 10. — Diminution rapide et considérable du volume de la main produite par l'aspiration d'une grande quantité de sang vers le membre inférieur enfermé dans la ventouse de Junod.

l'effet de la restitution de la pression atmosphérique sur la circulation du membre inférieur, et consécutivement sur celle des autres régions, est lent à se produire. Mais cette contre-épreuve établit cependant le mécanisme par lequel l'aspiration exercée sur le membre enfermé dans la ventouse avait agi sur la circulation de la main en particulier, et sur la circulation en général.

E. *Effet de la contraction énergique des muscles des membres inférieurs.*

La contraction d'un grand nombre de muscles, exercée avec énergie pendant quelques instants, sans modifications des mouvements respiratoires, élève la pression sanguine et produit en même temps l'augmentation du volume des régions qui restent en repos. Marey avait déjà noté l'ascension de la ligne d'ensemble du tracé sphygmographique.

J'ai constaté le même phénomène en recueillant une longue série de pulsations de la radiale avec le sphygmographe à transmission, et j'ai vu, en inscrivant simultanément le pouls radial et les changements du volume d'une main, les deux courbes s'élever en même temps quand je contractais fortement les muscles de mes deux membres inférieurs, et s'abaisser parallèlement quand je cessais la contraction.

Ce phénomène, abstraction faite de tout changement dans l'acte respiratoire, ne peut être rapporté qu'à la compression du système vasculaire dans un grand nombre de muscles par leur contraction énergique et prolongée. Ces muscles font refluer une grande quantité de sang artériel et chassent aussi du sang veineux qu'ils expriment pour ainsi dire, et qui, se déversant dans la circulation générale, y augmente la pression en déterminant du même coup l'augmentation du volume des régions dont les muscles sont relâchés.

Mais cette augmentation de volume n'est que peu accentuée vu l'importance relativement peu considérable de la modification circulatoire périphérique qui la détermine.

F. *Influence de l'élévation d'un membre supérieur sur la main du côté opposé.*

On sait que quand on élève verticalement un membre, la pression sanguine baisse considérablement dans ce membre : d'une part, en effet, le sang artériel y pénètre moins facilement, ayant à lutter contre la pesanteur ; d'autre part, le retour du sang veineux est facilité par cette même cause.

Dès lors sous l'influence de l'élévation d'un membre supérieur, les autres régions vont se trouver, par rapport à leur circulation, dans des conditions analogues à celles où

Fig. 11. — Effets de l'élévation et de l'abaissement successifs d'un membre supérieur sur la circulation du côté opposé. — Tracé des variations du volume de la main droite : on élève la main gauche de E en F. On la maintient élevée jusqu'au A ; en l'abcisse de A en A'.

Fig. 12. — Variations de la pression dans l'artère radiale quand on élève et quand on abaisse successivement le bras qui porte un sphygmographe à transmission. De *a* en *e*, on abaisse le bras ; à partir de *e*, on l'élève.

nous les avons vues déjà pendant la compression des fémorales.

On voit dans la figure 11 que l'élévation d'un membre supérieur commencée en E, terminée en E', n'a déterminé l'augmentation du volume de la main opposée qu'à partir du moment où elle a été complète.

En A, j'ai commencé à abaisser le membre que j'avais élevé verticalement et le volume de la main a diminué graduellement.

En A', l'abaissement du membre était complet, la main explorée avait repris son volume naturel.

Si l'on rapproche de ces effets sur le volume de la main opposée au membre qu'on élève et qu'on abaisse ensuite les effets produits sur le pouls radial d'un côté, quand on déplace dans le sens vertical le membre du côté opposé, on peut constater que les variations de la pression artérielle marchent dans le même sens que les variations du volume de la main.

A cette première contre-épreuve, il est facile d'en ajouter une autre : les changements de la pression artérielle dans le membre que nous déplaçons. On voit (fig. 12) le pouls se modifier [dans un sens ab-

solument inverse de celui que nous avons noté pour le membre qui reste au repos. Notons que les changements de pression qui se produisent dans le bras qu'on élève ou qu'on abaisse (fig. 12) sont beaucoup plus intenses que les effets inverses qui s'observent du côté opposé (fig. 11).

Résumé des influences qui agissent mécaniquement sur les changements du volume de la main.

Pour rappeler les principaux faits qui ressortent des expériences précédentes, je les grouperai dans les propositions suivantes :

1° Le volume de la main diminue quand on comprime l'humérale, et conserve quelque temps après la décompression un niveau plus élevé qu'au début de l'expérience.

2° Ce volume augmente considérablement par la compression des veines à la région du bras. Quand on cesse la compression, le volume reste augmenté, et ne reprend sa valeur initiale qu'après un temps qui varie suivant la durée et l'intensité de la compression.

3° La suppression d'un réseau vasculaire considérable, comme celui des membres inférieurs, obtenue par la compression des artères fémorales, les pressions exagérées exercées sur le membre inférieur dans la botte de Junod, la contraction musculaire des membres inférieurs, ces différentes causes retentissent sur la circulation du membre supérieur et y déterminent une notable augmentation de volume.

4° L'appel énergique du sang vers un membre inférieur provoqué par l'aspiration dans la ventouse Junod amène une grande diminution de volume des membres supérieurs.

5° L'élévation d'un membre supérieur produit l'augmentation du volume du membre opposé, et l'abaissement de l'un amène une diminution du volume de l'autre.

6° Tous ces phénomènes, étudiés par l'exploration des changements du volume d'une main, sont contrôlés par l'exploration du pouls radial à l'aide du sphygmographe à transmission.

§ II.

PHÉNOMÈNES VASCULAIRES DÉTERMINÉS PAR L'INFLUENCE DES NERFS.

A côté des phénomènes purement mécaniques que nous venons d'étudier, vient se placer toute une série de modifications vasculaires produite par la mise en jeu des *influences nerveuses*.

Nous savons aujourd'hui, par les recherches multipliées qu'ont suscitées les admirables travaux du professeur Cl. Bernard, que les vaisseaux de petit calibre sont susceptibles d'éprouver des variations considérables sous l'influence des nerfs qui se distribuent dans leurs parois.

Le plus frappant des effets provoqués par l'action de ces nerfs vasculaires, celui que la disposition annulaire des muscles des vaisseaux permet facilement de saisir, c'est le resserrement des parois musculaires et, à sa suite, la diminution de la quantité de sang admise dans les vaisseaux, l'abaissement de la température, la *diminution de volume*.

Cette dernière conséquence, la plus immédiate, pour ainsi dire, est aussi la plus facile à constater. Beaucoup de causes d'erreur viennent en effet compliquer sur l'homme la recherche de l'abaissement de température ; au contraire, le fait de la diminution de volume ne peut se dérober à l'investigation, quelque minime qu'on suppose la variation.

C'est donc par l'étude de la *diminution* de volume due au resserrement vasculaire que j'ai cherché à constater l'influence des nerfs vaso-moteurs provoquée directement ou par voie réflexe.

Le *froid* et l'*excitation électrique* sont les deux agents dont j'ai fait usage pour mettre en jeu l'influence vasculaire, et l'action du froid me paraissant plus simple, c'est elle que j'indiquerai tout d'abord.

Action du froid sur les vaisseaux.

Dans une première série d'expériences, la main était plongée dans l'appareil contenant de l'eau à 18° centigrades. Le bocal étant placé dans un grand vase, un robinet pouvait être ouvert à volonté, et verser tout d'un coup une grande quantité d'eau très-froide sur le bocal lui-même et par conséquent refroidir notablement son contenu.

Dans ces conditions, le resserrement des vaisseaux de la main se manifeste un peu tardivement à cause de la lenteur relative avec laquelle se produit l'abaissement de température du liquide dans lequel elle est plongée, mais on constate nettement la diminution de volume qui s'accentue à mesure que le refroidissement augmente. Il suffit du reste d'un abaissement de 3° ou 4° pour produire un effet très-marqué.

J'ai obtenu des résultats semblables, mais plus accusés, en refroidissant d'une autre manière l'eau dans laquelle ma main était plongée.

Au lieu de faire couler à la surface de l'appareil à immersion de l'eau très-froide, j'ai fait entourer le bocal de glace pilée mélangée de sel. Ce mélange réfrigérant a rapidement abaissé la température de l'eau de l'appareil, et en peu d'instants le volume de la main a considérablement diminué.

Ces expériences ne me permettaient pas de rechercher par quelle voie s'exerçait l'influence du froid, de savoir si les vaisseaux de la main étaient directement atteints, si l'impression, primitivement cutanée, se réfléchissait sur l'appareil nerveux vasculaire, et quelle pouvait être la voie de cet acte réflexe.

Pour pénétrer plus avant dans le mécanisme probable du phénomène, j'ai agi, non plus sur la main elle-même, mais sur la peau de l'avant-bras.

J'ai fait appliquer sur la peau de la région antérieure et interne du pli du coude un large morceau de glace, pendant que la partie inférieure de l'avant-bras et la main étaient plongées dans l'appareil, et que le tracé s'inscrivait.

Fig. 13. — Diminution du volume de la main à la suite de l'application (de F en F') d'un morceau de glace sur la peau de la région antéro-interne du pli du coude.

La figure ci-jointe montre qu'à partir du moment de l'application de la glace, qui a duré du point F au point F', il s'est écoulé un certain temps (4 secondes) avant que le volume des régions immergées ait commencé à diminuer. On voit alors baisser notablement le niveau des variations de volume. La ligne générale tombe assez bas pendant une quinzaine de secondes, puis remonte graduellement, mais elle n'atteint point pourtant son niveau primitif indiqué par la ligne de repère horizontale.

Ce n'est qu'après quelques instants que les vaisseaux se resserrent ; ils restent ainsi resserrés quelques secondes, puis se relâchent peu à peu.

N'est-ce pas là la marche habituelle des phénomènes de mouvement déterminés par l'excitation portée sur les nerfs ? *Un temps perdu, une période d'augment, une période de déclin ou de relâchement* (1).

Examinons maintenant quel est le trajet probable de cette action nerveuse.

La glace a été appliquée sur une région où le paquet vasculo-nerveux hu-

(1) L'influence du froid sur le calibre des vaisseaux peut, du reste, se démontrer chez l'homme de plusieurs autres manières. Par exemple, pendant qu'on inscrit le pouls de l'artère radiale avec le sphygmographe à transmission, on peut déterminer le resserrement de l'artère en appliquant sur son trajet un petit morceau de glace.

Dans le tracé suivant (fig. 14), on voit la radiale se rétracter après l'application d'un fragment de glace faite au début du tracé.

méral est très-superficiel. On pourrait supposer, dès lors, qu'il s'est produit sur les filets vasculaires accompagnant l'artère humérale et sur ceux qui sont contenus dans les nerfs médian, brachial cutané interne et cubital, une influence directe à cause de la proximité du point d'application.



Fig. 14. — Resserrement de l'artère radiale sous l'influence du froid. Un morceau de glace est appliqué sur son trajet de F en F'.

Pour vérifier cette hypothèse, j'ai repris l'expérience en appliquant la glace au côté externe et postérieur de la région. Le même effet s'est produit, malgré l'épaisseur du tissu qui séparait le réfrigérant du paquet vasculo-nerveux.

J'ai donc dû songer à la possibilité d'une *influence réflexe* dont le point de départ était dans les *filets nerveux cutanés* de la région sur laquelle on appliquait la glace, le point de réflexion aux *centres nerveux* médullaires, et l'aboutissant aux *nerfs vasculaires* du membre en expérience.

La réalité de ces réflexes des nerfs sensibles sur les nerfs vasculaires ne me semble pas douteuse, si l'on se borne à observer l'effet du resserrement vasculaire : la diminution du volume de la main gauche, pendant qu'on soumet un instant la main droite à l'influence du froid. Le fait n'est pas contestable, son interprétation seule peut prêter à la discussion; mais, comme je vais essayer de l'établir, le réflexe vasculaire rend bien compte du phénomène, et ce mécanisme, étant démontré pour l'expérience de l'effet croisé, me semble devoir être admis pour l'expérience de l'effet direct.

La main gauche étant placée dans l'appareil, on recueille le tracé des changements de volume. On voit dans la première partie du tracé suivant (fig. 15) le niveau général des pulsations s'inscrire au-dessus de la ligne horizontale qui sert de repère.

Au point F, un morceau de glace est appliqué sur la main

Fig. 15. Resserrement vasculaire réflexe accusé par la diminution du volume de la main gauche, quand on touche avec un morceau de glace le dos de la main droite.

droite, et l'on voit, au bout de trois secondes, diminuer le volume de la main gauche. Cette diminution de volume s'accentue peu à peu, atteint un certain niveau, reste à ce niveau une demi-minute, puis diminue progressivement. Au bout d'une minute la main a repris son volume naturel.

Si l'on veut bien rapprocher cette expérience de celle dans laquelle, un morceau de glace étant appliqué sur la peau de l'avant-bras du côté immergé, on notait les mêmes phénomènes, on verra tout de suite que la marche en est la même.

Du reste, le mécanisme de l'effet vasculaire croisé a besoin d'être étudié de près, car avant d'admettre un effet réflexe des nerfs sensibles d'une main sur les nerfs vasculaires de la main opposée, on doit successivement éliminer deux hypothèses possibles :

1° Le *refroidissement du sang* par l'application de la glace à la surface d'une main;

2° L'effet produit *sur le cœur* par cette impression périphérique.

1° Ce n'est pas le refroidissement du sang lui-même par l'application d'un morceau de glace sur la main droite qui détermine le resserrement vasculaire de la main opposée. On constate, en effet, la diminution du volume de la main gauche quand on ne fait que *toucher pendant une seconde* la peau du dos de la main droite, avec un morceau de glace : ce simple contact, tout bref qu'il soit, incapable de refroidir le sang d'une manière notable, est suffisant et au delà

pour déterminer une impression sur les filets nerveux cutanés de la main soumise à l'action du froid (1).

Quant au phénomène observé par MM. Brown-Séquard et Tholozan, l'abaissement de la température dans la main opposée à celle qu'on refroidissait, il n'était évidemment pas dû davantage à un refroidissement du sang.

Il me paraît inutile d'insister sur cette première question. J'ai cru devoir répondre à une objection qui m'a déjà été faite. En présence des obstacles matériels multipliés qui empêchent le refroidissement léger (si tant est qu'il existe) d'une petite quantité de sang de retentir sur la température de la masse sanguine au point d'amener de ce chef un resserrement des vaisseaux, je considère comme écartée l'hypothèse que je viens d'examiner.

2° On pourrait supposer maintenant que *l'impression* déterminée sur les filets nerveux cutanés d'une main est capable d'influencer le jeu du *cœur*, et d'en modifier le *rhythme* et *l'évacuation.* Dès lors, la diminution du volume de la main gauche, la main droite étant impressionnée, s'expliquerait par l'afflux d'une moindre quantité de sang, le *débit* ventriculaire étant *diminué*, ou la *fréquence* du cœur étant *moins grande*.

Il y avait évidemment à compter avec cette hypothèse, et *à priori* elle pouvait sembler logique, étant donné l'extrême

(1) Bien que l'exclusion du refroidissement du sang puisse paraître suffisamment appuyée sur cette seule considération, que la cause n'a agi qu'un temps très-bref, j'ai cru cependant qu'il était bon de la motiver davantage, en me fondant sur l'examen comparatif de la température axillaire à droite et à gauche avant et après l'expérience.

C'est ainsi, qu'en prenant les chiffres d'une expérience faite au mois de septembre 1875, j'arrive aux résultats suivants : température des deux côtés 36, $\frac{7}{10}$ avant l'expérience; pas de variation pendant que ma main droite serre un morceau de glace et le conserve 5 secondes; après l'expérience, le thermomètre du côté droit dont la main avait été en contact avec la glace restait à 36, $\frac{7}{10}$; *le même chiffre s'était maintenu à gauche, alors que le volume de la main avait très-notablement diminué.*

Dans d'autres expériences faites à des moments divers, les chiffres initiaux variaient, mais leur valeur se maintenait comme précédemment.

sensibilité du cœur aux impressions périphériques, et la facilité avec laquelle il modifie son rhythme quand une impression extérieure un peu vive nous affecte plus ou moins péniblement.

Le seul moyen de vérifier le fait était d'étudier le jeu du cœur avant, pendant et après l'épreuve du froid.

L'influence du froid intense sur la peau de la main peut modifier la fonction cardiaque quand *elle est soudaine et douloureuse :* dans des recherches qui font l'objet d'un mémoire spécial contenu dans ce volume, j'ai déterminé, soit chez l'homme, soit chez les animaux, des troubles cardiaques passagers (arrêt, ralentissement) en impressionnant vivement et douloureusement, par surprise pour ainsi dire, des régions très-sensibles (1).

Mais, dans le cas dont je m'occupe ici, l'impression déterminée sur la peau du dos de la main gauche par l'application d'un morceau de glace pendant une, deux ou trois secondes, s'est toujours montrée insuffisante comme intensité pour provoquer une modification cardiaque appréciable. En effet, l'examen de tous les tracés démontre que, dans les conditions de l'expérience actuelle, il n'y a pas de ralentissement du cœur, et que, par conséquent, la diminution du volume de la main gauche, observée après l'application du froid sur la main droite, ne relève point de cette cause.

Mais, dira-t-on, si le cœur n'est point ralenti, sa fonction n'en est-elle pas moins modifiée ? Peut-être ne se vide-t-il plus aussi complétement à chaque systole après l'impression périphérique du froid. Il est un détail du tracé de la pulsation cardiaque dont l'examen comparatif permet de juger de la plus ou moins complète évacuation du cœur. Nous allons l'utiliser :

Quand on applique sur la région précordiale le bouton d'un explorateur à tambour de Marey, la diminution du volume du cœur se vidant pendant la seconde période de la phase systolique s'accuse par une ligne obliquement descendante. L'évacuation du cœur est-elle facile et complète, la ligne du

(1) V. *Mémoires sur les influences des nerfs sensibles sur le cœur.*

tracé qui la représente aura une chute rapide, presque verticale (1). Or, si l'on examine les tracés de la pulsation du cœur recueillis en même temps que ceux des changements du volume de la main pendant l'expérience de l'action du froid, on s'assure facilement que rien n'est changé à l'évacuation de ce cœur quand diminue le volume de la main. Cet effet n'est donc point dû à un débit moins considérable du cœur.

Ces deux hypothèses sur la cause de la diminution de volume d'une main quand la main opposée est soumise au contact d'un corps froid étant éliminées, voyons si l'hypothèse d'un *acte réflexe* ayant son point de départ dans l'impression produite par le froid sur la peau de la main droite, son point de réflexion à la moelle, son point d'arrivée aux nerfs vasculaires de la main gauche, satisfait aux conditions du phénomène.

Cette explication, déjà proposée par MM. Brown-Séquard et Tholozan, a été adoptée par les physiologistes qui ont répété avec succès leur expérience. Mais il faut voir : 1° si les données anatomiques permettent d'interpréter ainsi nos résultats ; 2° si les différentes phases du phénomène s'accordent avec les données expérimentales connues des actions réflexes.

1° Les nerfs vasculaires du membre supérieur se détachent de la moelle entre les 3ᵉ et 7ᵉ racines dorsales, remontent par le cordon sympathique, et vont se partager ensuite entre les nerfs mixtes du plexus brachial et les réseaux nerveux qui entourent les gros troncs artériels de la racine du membre (2).

Si donc, les nerfs vasculaires du membre supérieur proviennent de la moelle en même temps que les nerfs moteurs ordinaires, on comprend qu'une excitation périphérique cheminant jusqu'à la région des centres médullaires dont ils émanent puisse se réfléchir sur ces nerfs vasculaires, aussi bien que sur les racines des nerfs destinés aux muscles striés.

(1) V. Marey, *Mémoire sur la pulsation cardiaque*, Travaux du laboratoire, Paris, G. Masson, 1875.

(2) François-Franck, *Mémoire sur les nerfs vasculaires*, Travaux du laboratoire du professeur Marey, 1875.

Je me rattacherais donc déjà, pour ce motif, à l'interprétation ci-dessus énoncée du resserrement vasculaire ; mais je trouve, dans la discussion des phases mêmes du phénomène, une raison bien plus positive pour adopter l'effet réflexe.

2° Les différentes phases de l'expérience sont tout à fait d'accord avec l'hypothèse d'une action réflexe.

Il a suffi de l'impression passagère produite sur la peau du dos de la main droite par le contact d'un morceau de glace pour déterminer un resserrement vasculaire très-appréciable dans la main opposée.

Il s'écoule, entre l'instant de l'impression et le moment où débute le resserrement vasculaire accusé par l'inclinaison descendante du tracé, *un temps relativement long*, qui ne dure *pas moins de trois secondes*, et varie au delà de cette limite minimum dans des conditions que nous aurons à examiner tout à l'heure. Ce temps qui précède l'apparition de l'acte musculaire dont les vaisseaux sont le siége, se décompose lui-même en plusieurs facteurs : la durée de la transmission à travers les nerfs et le *temps perdu des muscles* proprement dit. Or, c'est évidemment le dernier terme, le temps perdu des muscles vasculaires, qui représente la majeure partie de la durée totale de trois secondes au minimum.

Il existe un rapport constant entre la durée du *temps perdu* d'un muscle et la durée de la secousse : les muscles striés, à secousse brève, ont un temps perdu très-court (de deux centièmes de seconde environ) ; les muscles lisses, au contraire, dont la secousse est lente et progressive, présentent un temps perdu beaucoup plus considérable. C'est la valeur de cet intervalle, séparant le moment de l'impression du moment de la réaction, que nos courbes nous indiquent comme équivalant à plusieurs secondes.

Le temps perdu des muscles vasculaires varie, du reste, comme le temps perdu des autres muscles, avec la fatigue qui résulte de la fréquente répétition de l'acte. Quand nous reproduisons l'expérience du resserrement vasculaire réflexe un certain nombre de fois en peu de temps, nous voyons que le début de ce resserrement retarde de plus en plus sur le moment du contact du corps froid.

Si nous envisageons maintenant les *phases* mêmes de l'acte musculaire dont nous venons d'étudier le *temps perdu*, nous voyons qu'il s'accentue progressivement à partir de son début jusqu'à une certaine valeur qu'il conserve près d'une demiminute. Cette phase d'augment du resserrement vasculaire s'accuse par une diminution de volume du tissu exploré, diminution qui va d'abord croissant, puis se maintient pendant que dure le resserrement des vaisseaux. Après une période d'état, la contraction vasculaire s'atténue, et avec elle la diminution de volume. C'est ainsi que, par degrés, le tissu reprend son volume initial. Mais quand on répète l'expérience à plusieurs reprises, on s'aperçoit que l'effet réflexe est de moins en moins marqué.

Ce phénomène a son intérêt en ce qu'il peut être rattaché à deux causes différentes, ayant l'une et l'autre une grande part à sa production : la *fatigue* du muscle soumis à des réactions trop fréquentes, sans repos compensateur, et l'*accoutumance* des nerfs sensibles sur lesquels est portée l'impression du froid. Il me paraît impossible de déterminer la part de chacun de ces deux facteurs dans l'affaiblissement progressif des effets observés ; mais il est constant, d'un côté, que le temps perdu de la réaction musculaire augmente par degrés, ce qui implique la fatigue musculaire, et, d'un autre côté, que l'on s'habitue à l'impression et que la sensibilité s'émousse par la répétition même du contact du corps froid.

De ces diverses remarques, il me semble logique de *conclure à la nature réflexe du resserrement vasculaire dans une main, quand on impressionne par le froid la peau de l'autre main.*

Influence de l'électricité sur le calibre des vaisseaux et, par suite, sur le volume des organes.

L'influence de l'excitation électrique des nerfs vasculaires, dans les expériences sur les animaux, se traduit le plus souvent par le resserrement des vaisseaux, et cet effet se déduit directement de la terminaison des nerfs excités dans les fibres lisses à disposition annulaire.

Si l'on généralisait cette notion fournie par les excitations des branches vasculaires du grand sympathique, on s'attendrait à trouver, dans tous les cas d'excitation électrique portant sur les nerfs des vaisseaux, un effet identique à celui que le professeur Cl. Bernard et, après lui, tous les physiologistes ont constaté en électrisant le bout phériphérique du sympathique cervical : la contraction des vaisseaux et, avec elle, la diminution de volume et l'abaissement de température des régions qui subissent cette modification circulatoire.

Il est cependant incontestable que l'excitation de certains nerfs (indépendamment des actes réflexes compliqués auxquels elle pourrait donner lieu) provoque, au contraire, la dilatation vasculaire. C'est ce qui se produit quand on agit sur le bout périphérique de la corde du tympan (Bernard, Ludwig), du sciatique (Goltz, Mazius et Vanlair), du glosso-pharyngien (Vulpian).

De cette observation date, en physiologie, l'introduction des nerfs *vaso-dilatateurs*, dont le mode d'action intime nous échappe, les notions anatomiques sur la disposition des muscles vasculaires ne nous permettant pas de concevoir le mécanisme d'une *dilatation directe*.

Nous sommes, dès lors, engagés à voir dans ces nerfs vaso-dilatateurs les analogues des nerfs pneumogastriques, et à les considérer comme des nerfs d'arrêt, des nerfs dont la mise en jeu suspend l'activité des centres ganglionnaires situés dans les parois vasculaires.

Dans ces recherches, j'ai cru devoir me borner à étudier l'action des nerfs vasculaires *constricteurs*, et j'en exposerai

succinctement l'effet, tel qu'il me semble se dégager d'un nombre assez considérable d'expériences.

Cette action a été provoquée par l'excitation de la peau au moyen des *courants induits* (1).

J'ai dû introduire dans mon appareil un élément nouveau pour réaliser l'expérience de l'excitation faradique au sein du liquide dans lequel ma main était plongée.

Un fil conducteur, recouvert de soie et verni, traversait l'orifice supérieur du bocal et se terminait par un bouton métallique que je tenais dans la main immergée.

L'autre électrode du circuit d'induction consistait en une plaque métallique que je fixais au moyen d'un ruban sur la partie antéro-interne du pli du coude.

Les choses étant ainsi disposées, je m'assurais du sens dans lequel circulait le courant induit de *rupture*, celui dont l'intensité est surtout importante à considérer, et je plaçais les conducteurs de façon à ce qu'il pénétrât dans le membre par la main et sortît par l'électrode supérieure.

Les interruptions du circuit inducteur étaient déterminées à l'aide d'un trembleur réglé d'avance; un signal électro-magnétique de M. Deprez inscrivait, au-dessous du tracé des changements de volume, les clôtures et les ruptures de ce circuit.

J'ai étudié tout d'abord l'influence d'une série d'excitations induites assez faibles pour ne déterminer qu'une sensation légère de fourmillements dans le membre en expérience.

Le tracé suivant est l'un des nombreux types recueillis dans ces recherches.

On voit que les variations normales du volume de la main s'inscrivent avant et pendant l'excitation sur la même ligne,

(1) Je n'aborderai pas ici les effets produits sur la circulation vasculaire par les *courants continus*. Cette réserve m'a paru nécessaire en présence des assertions des auteurs qui ont attribué une action aux courants descendants, une action inverse aux courants ascendants, et cela, sans doute, d'après des examens détaillés et des observations fréquemment répétées.

Comme je n'ai constaté, dans les expériences peu nombreuses que je fis sur ce sujet, qu'une action commune aux deux ordres de courants, le resserrement (du moins comme fait initial), je crois devoir subordonner mon opinion sur ce point à des recherches plus variées.

et que leur niveau ne commence à s'abaisser qu'un certain temps après que l'excitation induite a cessé.



Fig. 17. — Variations du volume de la main.

On voit la ligne de niveau de ces variations s'abaisser progressivement après l'excitation induite de la peau faite de I en I.

Il faut chercher à établir :

1° Que la diminution de volume constatée tient à un resserrement des vaisseaux provoqué par la faradisation ;

2° Que cette modification ne reconnaît pas d'autre cause.

L'excitation induite que j'ai supposé provoquer le resserrement vasculaire pourrait agir sur les muscles striés et, déterminant leur contraction, amener ainsi l'expulsion du sang.

Pour vérifier mon hypothèse, j'ai commencé par m'assurer que l'excitation dont j'avais fait usage ne pouvait provoquer la contraction musculaire.

La main et l'avant-bras ont été soumis, en dehors de l'appareil à déplacement, à la même excitation, et aucune contraction ne s'est produite, comme j'ai pu m'en convaincre en appliquant sur divers groupes musculaires l'instrument explorateur du mouvement. (Myographe à transmission, modifié pour l'exploration des muscles chez l'homme.)

Je n'ai pas constaté d'autre phénomène que celui de la chair de poule avec redressement des poils, et son apparition n'a fait que me confirmer dans l'idée que l'excitation, même faible, produit son action sur les muscles lisses.

J'ai voulu établir de plus que la contraction des muscles striés, toute modification circulatoire mise à part, n'était nullement capable de produire par elle-même la diminution de volume du membre :

L'artère humérale étant comprimée un temps suffisant pour que la main se vide aussi complétement que possible du sang qu'elle contenait, j'excite l'ensemble des muscles de la main et de l'avant-bras avec des courants induits assez

intenses. Quoique ces muscles restent contractés pendant toute la durée du passage des courants, le niveau initial du volume de la main ne change pas. Ce fait était à prévoir, maintes expériences ayant déjà démontré que le muscle, en se raccourcissant, ne change pas de volume, mais seulement de forme.

Il est maintenant un détail du phénomène observé dans la diminution du volume de la main après l'excitation induite, qui pourra nous bien assurer de la provenance vasculaire de ce retrait : c'est le retard de son moment d'apparition sur l'instant de l'excitation.

En se reportant à la figure 17, on voit que la main ne commence à diminuer qu'un certain temps après que l'excitation indiquée par le signal a cessé. Or, ce temps correspond au *temps perdu* des muscles lisses, sur lequel j'ai déjà insisté à propos de l'action réflexe du froid : il est de 2 secondes 1/2 à 3 secondes.

Le phénomène que ce temps perdu précède offre ici encore les caractères d'un acte musculaire lent et progressif, ayant sa phase d'augment, sa phase d'état et sa phase de déclin.

Je n'insisterai pas de nouveau sur chacune de ces particularités, m'étant assez longuement étendu sur leur valeur dans le chapitre précédent.

Ces derniers détails s'ajoutent aux remarques qui précèdent pour permettre cette conclusion : *que la diminution du volume de la main, qui survient après l'excitation induite de la peau, est due à l'influence des nerfs vaso-constricteurs sur le calibre des vaisseaux.*

---

§ III.

RAPPORTS DES CHANGEMENTS DU VOLUME DE LA MAIN AVEC LA RESPIRATION NORMALE OU MODIFIÉE.

A. Quand on examine la ligne d'ensemble des pulsations de la main, on y remarque de grandes oscillations dans les-



Fig. 18. — Changements du volume de la main (St) et courbe respiratoire R. — Tracés recueillis simultanément. (Appareil à déplacement et pneumographe.)

quelles il est facile de reconnaître l'influence des mouvements respiratoires.

Pour chercher à bien préciser dans quel sens agissaient l'inspiration et l'expiration sur le volume de la main, ou, en d'autres termes, sur la circulation périphérique, j'ai recueilli, en même temps que les courbes des dilatations et resserrement de la main, *les courbes respiratoires.*

Le pneumographe de Marey étant appliqué sur la poitrine, chaque inspiration s'accusait par la ligne de descente de la courbe respiratoire, chaque expiration par la ligne ascendante.

Au-dessous de ce tracé, et simultanément, j'inscrivais les pulsations de la main, et je pouvais suivre les rapports que présentaient, avec les courbes

respiratoires, les grandes oscillations de la ligne d'ensemble.

Ce sont ces rapports que l'on retrouve dans la première partie, à gauche du double tracé de la figure 18.

On voit que la main atteint un volume plus considérable pendant la période ascendante de la courbe respiratoire (expiration), et diminue de volume pendant l'inspiration.

Si nous cherchons à interpréter cette double influence des mouvements respiratoires, nous devons nous reporter aux données physiologiques relatives à l'influence de la respiration sur la pression sanguine.

En effet, comme j'ai eu souvent déjà l'occasion de le rappeler, ces deux ordres de phénomènes, *volume des organes* et *pression du sang* (1), sont dans un rapport constant.

Les auteurs ont surtout étudié l'influence des mouvements respiratoires sur la circulation veineuse, et tous ont reconnu l'action aspiratrice qu'exerce la dilatation thoracique sur le sang contenu dans les gros troncs veineux avoisinant la poitrine. Les physiologistes qui, depuis Ludwig, ont examiné l'action de la respiration sur le cours du sang artériel, ont émis sur ce point les opinions les plus divergentes.

Le professeur Marey a justement insisté sur la cause de cette différence dans les résultats constatés par ses prédécesseurs, et a montré que l'influence de la respiration sur la pression artérielle varie suivant le mode respiratoire lui-même.

Il résulte des recherches de Marey :

1° Que, quand on respire normalement, c'est-à-dire quand l'influence thoracique et l'influence abdominale, inverses l'une l'autre, se contre-balancent, la ligne d'ensemble du tracé des variations de pression ne présente que des ondulations peu accusées ;

2° Que, si l'on exagère l'amplitude des mouvements de la respiration, on exagère parallèlement les grandes ondulations du tracé de la pression, et c'est alors que l'on peut constater nettement sur le pouls radial les rapports notés par Ludwig pour la pression carotidienne : l'abaissement de la pression pendant l'inspiration, son élévation pendant l'expiration.

(1) Voy. Marey, *Physiologie médicale de la circulation.*

La circulation de la main varie dans le même sens que le pouls radial quand on exécute de larges mouvements respiratoires. La première partie du tracé (fig. 18) montre nettement ce rapport.

Mais il est encore bien plus accentué quand on reporte artificiellement sur la circulation sanguine une grande partie des effets qui, normalement, s'exercent sur l'air en mouvement dans le poumon.

Cette expérience consiste tout simplement à respirer en fermant la bouche et en aplatissant une narine. L'air entre et sort par un passage étroit ; son entrée et sa sortie sont rendues difficiles, et dès lors, quand s'exerce, pendant l'inspiration, l'appel de cet air vers la poitrine, il n'y arrive que lentement. Le sang s'y trouve, par suite, plus énergiquement attiré et la pression baisse nécessairement davantage. Inversement, quand le retrait du poumon tend à expulser l'air pendant l'expiration, l'obstacle qui existe à sa sortie retardant son départ, c'est encore la circulation qui se ressent de l'excès de pression intra-thoracique ; et la tension artérielle s'élève plus haut que dans les conditions ordinaires.

J'ai réuni dans la figure suivante (fig. 19) les effets d'une respiration large et d'une respiration avec obstacle à l'entrée et à la sortie de l'air.

Pendant la première partie de l'expérience, la respiration est nor-

Fig. 19. — Changements du volume de la main. — Leurs rapports avec les mouvements respiratoires. La première partie du tracé, à gauche de la figure, correspond à une respiration lente et acile. — La seconde, à partir du point E, montre que l'obstacle au passage de l'air détermine des variations très-accusées dans la circulation périphérique.
E. Période d'augment, en rapport avec l'expiration.
I. Période de diminution de volume en rapport avec l'inspiration.

male, lente et facile : le niveau général du tracé des changements de volume de la main varie peu ; on observe seulement une grande oscillation peu marquée.

A partir du point E, je respire plus vite en fermant la bouche et une narine ; aussitôt commencent les ondulations très-accentuées dont la partie ascendante correspond à l'expiration, la partie descendante à l'inspiration.

Dans cette seconde partie du tracé, on voit nettement prédominer les influences thoraciques.

B. — *Influence de l'effort sur les changements du volume de la main.*

D'après les notions que je viens de rappeler sur l'influence que les mouvements d'inspiration et d'expiration exercent sur la circulation périphérique, nous devons nous attendre à retrouver amplifiés au maximum ces doubles effets dans l'effort et dans l'inspiration profonde.

L'effort consistant en une pression brusque et soutenue exercée sur les organes intra-thoraciques, la glotte fermée, des conséquences mécaniques de trois ordres principaux doivent en résulter :

1° Le sang artériel doit être énergiquemeut poussé vers la périphérie ;

2° Le sang veineux doit éprouver une certaine difficulté à revenir au cœur ;

3° Le cœur lui-même doit se vider plus facilement, d'une part à cause de la pression qui s'ajoute à l'élasticité artérielle, d'autre part à cause de sa situation dans le milieu comprimé.

Nous allons facilement constater ces effets de l'effort en examinant le tracé des changements du volume de la main que je reproduis ici et dont je signale avant tout la parfaite ressemblance avec le tracé du pouls radial, recueilli dans les mêmes conditions.

L'effort débute au moment indiqué par un point sur l'abscisse : on constate d'abord l'élévation graduelle de la courbe,

Fig. 20. — Changements du volume de la main pendant et après l'effort.
L'effort commence au point marqué par un trait sur la ligne horizontale servant d'abscisse ; il cesse au moment de la chute du tracé.

puis son inflexion dans la dernière partie de la période ascendante, enfin sa chute brusque, qui marque le moment de la cessation de l'effort.

Vient ensuite la diminution graduelle du volume de la main et le ralentissement si remarquable des pulsations qu'on note toujours après l'effort un peu violent.

L'analyse des différentes périodes de l'effort, au point de vue des modifications subies par la pression artérielle, a été faite d'une manière si complète par le professeur Marey, que tout ce qu'il en a dit serait à reproduire textuellement pour ce qui concerne les changements du volume de la main.

Je résumerai donc simplement les phénomènes principaux qui s'offrent ici à l'examen, et je renverrai pour tous les détails à l'ouvrage de Marey sur la Physiologie médicale de la circulation.

Dans la figure 20, on voit qu'au début du tracé, les trois premières pulsations de la main s'inscrivent sur un même niveau. Dès que commence l'effort, les variations du volume s'inscrivent sur un niveau de plus en plus élevé, en même temps que la fréquence des pulsations augmente et que leur dicrotisme normal s'accentue davantage, tous phénomènes identiques à ceux que l'on connaît pour le pouls radial.

Cette augmentation du volume de la main pendant l'effort est évidemment subordonnée à l'augmentation de la pression intra-thoracique qui s'exerce sur l'aorte et sur le cœur lui-même.

On comprend que le sang contenu dans l'aorte soit plus facilement chassé vers les branches périphériques, puisque l'élasticité du vaisseau est renforcée par la pression qui s'exerce à sa surface. De plus le cœur, auquel l'excès de la pression thoracique vient en aide, se vide plus complétement et plus vite.

Ces deux conditions expliquent en grande partie l'augmentation du volume de la main, comme elles rendent compte de l'élévation de la pression dans la radiale.

Mais faut-il accorder également une grande importance à l'obstacle subi par la circulation veineuse, et considérer comme ayant une large part dans l'augmentation du volume de la main la stase du sang veineux ?

Si l'on se reporte aux expériences mentionnées dans le chapitre Ier, aux effets de la *compression veineuse*, on pourra s'assurer que dans l'effort le retour du sang veineux *de la main* n'est point entravé, ou, du moins, ne l'est que dans une assez faible mesure pour qu'il n'y ait pas lieu d'en déduire l'augmentation de volume.

Nous savons en effet que la ligne de descente de chaque pulsation correspond à l'écoulement du sang dont le reflux a été indiqué par la ligne d'ascension. Or, dans la compression veineuse, l'obstacle au retour du sang se caractérisait par la disparition graduelle de cette ligne descendante.

Dans le tracé de l'effort, nous voyons *persister* cet indice de l'écoulement et s'accentuer le dicrotisme.

Nous sommes donc en droit de n'accorder qu'une faible importance à cette stase veineuse, *au moins pour ce qui concerne la circulation d'un organe éloigné de la poitrine comme la main.*

Les phénomènes qui succèdent à l'effort ne sont pas moins intéressants à bien analyser : leur identité dans les changements du volume de la main et dans les variations de la pression radiale est frappante, et nécessitée, du reste, par la communauté des causes qui les produisent dans les deux cas.

Quand cesse brusquement l'excès de pression qui maintenait affaissées les parois du réservoir aortique, la tension diminue brusquement dans les artères périphériques, le sang s'accumule dans cette aorte redevenue béante ; le cœur dès

lors déverse son contenu dans le réservoir artériel sans que les branches qui en émanent puissent encore recevoir une grande quantité de sang. Le volume des organes diminue donc à ce moment, et ce n'est qu'après 7 ou 8 pulsations qu'il commence à reprendre son niveau primitif.

L'étude qui précède des changements du volume de la main et des variations de la pression radiale permet donc, une fois de plus, de rapporter à une commune origine les modifications du calibre d'une masse vasculaire tout entière et les changements de la tension artérielle.

Influence de l'inspiration profonde sur la circulation périphérique.

L'influence des modifications que l'effort d'expiration détermine dans la circulation périphérique permet de bien comprendre les rapports qui unissent l'expiration ordinaire à l'élévation de la pression artérielle et à l'augmentation du volume de la main.

L'étude de l'influence qu'exerce une inspiration profonde, réalisant avec l'intensité maximum les conditions de l'inspiration normale, nous permettra de comprendre également le rapport normal entre l'inspiration ordinaire et la diminution de la pression artérielle, d'une part, la diminution du volume d'un organe périphérique, d'autre part.

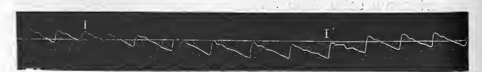


Fig. 21. — Diminution du volume de la main pendant l'inspiration profonde, de I en I'

La figure 21 donne un exemple très-net de la diminution de volume que subit la main pendant une inspiration profonde.

Si l'on veut obtenir la diminution maxima, il faut évidemment déterminer la plus grande somme possible d'aspiration thoracique sur le sang veineux et artériel. Dans ce but, on

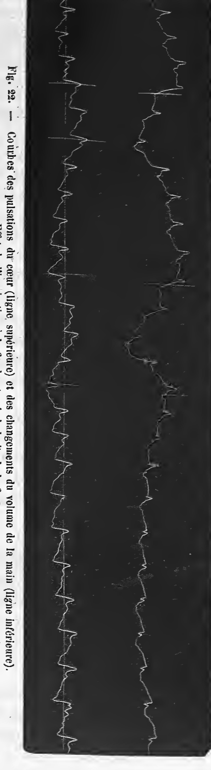


Fig. 22. — Courbes des pulsations du cœur (ligne supérieure) et des changements du volume de la main (ligne inférieure). Effet de l'inspiration à la fin du tracé, à droite de la figure.

rétrécit, par l'occlusion d'une narine, la voie d'entrée de l'air qu'appelle vers le poumon la dilatation de la paroi thoracique, et cet air n'arrivant point assez vite, ni en quantité suffisante pour satisfaire à la diminution de la pression intra-thoracique, l'afflux du sang veineux et l'aspiration du sang artériel se trouvent ainsi favorisés. C'est ce qui a été fait dans l'expérience qui a fourni le tracé 21.

Dans une même expérience, j'ai inscrit les changements du volume de la main et la pulsation cardiaque. On voit dans la figure 22 la courbe des battements du cœur avec les oscillations respiratoires et les courbes des pulsations de la main avec les mêmes influences de la respiration.

A partir du dernier repère vertical, j'exécute une inspiration profonde. Pendant que la main subit l'influence de l'aspiration thoracique, *on voit que le cœur se gorge de sang, que la réplétion devint prédominante*. L'évacuation se faisant incomplétement, et le sang veineux y affluant de plus en plus, la systole s'atténue d'une façon manifeste, comme on en peut juger en

observant la décroissance des sommets des pulsations du cœur. (Un fait important et dont l'interprétation rigoureuse n'est point donnée, c'est la forme *négative* de la pulsation cardiaque. *Voyez* à ce sujet, dans le même volume, mon mémoire sur l'influence des nerfs sensibles sur le cœur.)

J'ai eu surtout un but dans ce paragraphe, celui d'indiquer l'influence des mouvements respiratoires sur la circulation périphérique :

1° En établissant tout d'abord que les vaisseaux de la main se vident plus complétement et reçoivent moins de sang pendant l'*inspiration*, et sont distendus par des afflux sanguins plus considérables pendant l'*expiration;*

2° Que l'effort pousse, sous une forte pression, du sang artériel à la périphérie et favorise l'évacuation du cœur;

3° Qu'une inspiration profonde, avec obstacle à la rentrée de l'air, détermine une puissante aspiration veineuse et artérielle vers la poitrine, et s'accompagne d'une réplétion exagérée du cœur.

CONCLUSIONS DES EXPÉRIENCES.

1. Les doubles mouvements de la main, affectant avec la fonction cardiaque les mêmes rapports que le pouls d'une seule artère, doivent être considérés comme l'expression directe des *variations totalisées du volume* des petits vaisseaux.

2. L'expansion vasculaire de la main retarde sur la systole cardiaque de la même quantité que le pouls radial. Ce retard augmente ou diminue suivant que l'évacuation du cœur gauche est lente ou rapide.

3. Chaque variation du volume de la main présente un dicrotisme simple ou double, identique à celui du pouls artériel, et reconnaissant la même cause (onde liquide de retour).

4. Le volume des organes explorés diminue sous l'influence de *causes mécaniques* variées (compressions artérielles, aspiration du sang vers d'autres organes), « ventouse Junod. »

5. Ce volume augmente au contraire quand on provoque mécaniquement l'accumulation du sang dans l'organe : la compression veineuse réalise cette condition au maximum ; il arrive même un moment où le sang artériel ne peut plus pénétrer dans la main quand on supprime les voies de retour ; la pression dans la main fait alors équilibre à la pression dans les artères. — D'autres causes mécaniques déterminent aussi l'augmentation du volume de la main, par exemple la compression d'artères importantes (les fémorales), l'élévation du bras opposé, etc.

6. Des *influences nerveuses*, directes ou réflexes, modifient le volume des organes en modifiant le calibre de leurs vaisseaux.

Le refroidissement de l'eau dans laquelle la main est immergée détermine un resserrement vasculaire et une diminution de volume.

L'application *passagère* du froid sur la peau du bras détermine une diminution de volume dans la main correspondante, par le resserrement des petits vaisseaux dû à un *acte réflexe des nerfs sensibles sur les nerfs vasculaires.*

La réalité de *ce réflexe* se démontre par l'exploration du volume d'une main quand on impressionne la main opposée par le simple contact d'un corps froid :

L'expérience démontre en effet qu'il ne s'agit point, dans ce phénomène, d'un refroidissement du sang, ni d'une modification apportée au jeu du cœur ; le temps qui s'écoule entre l'instant de l'impression et l'apparition du resserrement des muscles vasculaires (temps perdu des muscles lisses) augmente avec la fatigue de ces muscles.

7. *Les mouvements respiratoires* modifient la valeur du volume des organes dans le même sens que la pression artérielle : Dans les respirations ordinaires, larges et faciles, le volume de la main augmente pendant l'expiration, diminue pendant l'inspiration. Mais les rapports des courbes de variations du volume avec les courbes respiratoires peuvent varier suivant le type de la respiration (thoracique, abdominale, etc.).

8. L'effort, par la compression intra-thoracique et intra-abdominale, chasse du sang artériel vers la périphérie, et facilite l'évacuation du cœur.

II.

DES EXCITATIONS ÉLECTRIQUES DU CŒUR,

par E.-J. MAREY.

SOMMAIRE

Comparaison du cœur avec les autres muscles. — Action des courants induits isolés; effets sur le cœur qui a cessé de se mouvoir; systoles de l'oreillette et du ventricule; durée de chacune d'elles; durée du temps perdu qui les précède. — Action des courants induits sur le cœur en place et qui a ses mouvements propres : Expérience de Bowditch. — Influence de la phase d'une révolution cardiaque où l'excitation a été produite. — Influence de la température sur l'excitabilité du cœur. — Effets de courants induits successifs; influence de la fréquence des courants; influence de leur force. — Tétanisation incomplète du cœur; théorie de ce phénomène. — Effets des courants de pile de courte durée; leur analogie avec ceux des courants induits. — Tétanisation incomplète du cœur par les courants continus; théorie de ces effets.

Lorsqu'on soumet le cœur d'un animal à des excitations artificielles capables de produire dans un muscle strié des secousses ou des tétanos, on constate que le cœur présente des réactions singulières qui diffèrent suivant les conditions où il se trouve, et suivant la nature ou l'intensité de l'excitant qu'on a employé. Il est très-important de comparer plus attentivement l'excitabilité du cœur à celle des autres muscles, d'autant plus que les exceptions aux lois physiologiques sont, en général, plutôt apparentes que réelles. Peut-être une étude plus approfondie rapprochera-t-elle les propriétés du muscle cardiaque de celles des autres muscles dont un examen superficiel tendrait à le distinguer.

Dans cette recherche, il faudrait passer en revue, tour à tour, l'action des excitants de différentes natures, et l'influence que chacun d'eux exerce sur le cœur, suivant les conditions où cet organe se trouve placé.

Je crois avoir déjà rapproché le cœur des autres muscles de l'organisme en montrant que le caractère intermittent et rhythmé des systoles de cet organe n'a rien qui lui soit propre et qu'on peut légitimement assimiler la série des systoles que le cœur exécute sans cesse à la série des secousses que produit un muscle contracté; toute la différence consiste dans la durée des secousses du cœur qui dépasse de beaucoup celle des muscles soumis à la volonté (sauf chez la tortue et chez les animaux en état d'hibernation), et dans l'intervalle considérable qui sépare deux secousses consécutives du cœur. C'est cet intervalle qui empêche les systoles cardiaques de se fusionner en un tétanos ou une contraction permanente.

Mais on peut voir une tendance manifeste vers cette fusion et vers la production d'un véritable tétanos du cœur, toutes les fois que, par une influence quelconque, on accélère le rhythme des systoles. Ainsi, par le chauffage, on accélère le rhythme du cœur, et on finit par mettre cet organe en tétanos presque complet. Cet état ne diffère en rien de celui d'un muscle qu'on soumettrait à une série d'excitations électriques de plus en plus fréquentes.

D'autre part, si l'on considère isolément une secousse du muscle cardiaque, on observe une notable différence dans la durée de ce mouvement, suivant qu'on explore l'oreillette ou le ventricule. Ces deux parties du cœur sont formées par des fibres musculaires douées de fonctions différentes.

L'oreillette donne un mouvement brusque et de courte durée; le ventricule réagit d'une façon plus tardive et plus lente. Pour bien observer ces mouvements, il faut prendre un cœur isolé et dont les mouvements propres aient disparu. On est alors bien certain que tout mouvement qui se produit est dû à l'excitation artificielle qu'on a fait agir sur l'organe, et on peut mesurer avec exactitude le temps qui sépare l'excitation de la réaction du muscle, ainsi que la durée et les phases du mouvement provoqué.

Ces expériences fournissent un résultat favorable à l'assimilation du cœur aux autres muscles; elles montrent, en effet, que suivant la loi générale, le ventricule, dont le mouvement est plus lent que celui de l'oreillette, présente un *temps perdu* (retard du mouvement sur l'excitation) plus grand que celui de l'oreillette. Or, dans tous les muscles, on observe que la durée du temps perdu est proportionnelle à la durée de l'acte musculaire lui-même.

Un cœur d'animal isolé et dépourvu de mouvements propres semble conserver son excitabilité pour les chocs, les piqûres ou autres influences traumatiques, lors même qu'il cesse de réagir à des courants induits assez intenses. Enfin, on observe nettement la propagation de l'onde musculaire sur les fibres du ventricule, quand celui-ci est affaibli et n'a plus que des systoles lentes. C'est le même phénomène qui a été décrit depuis longtemps sous le nom de péristalticité des mouvements du cœur; mais il semble préférable de désigner sous le nom de *transport de l'onde musculaire* cette propagation du mouvement systolique, attendu que cette désignation rappelle l'identité de l'acte ondulatoire dans le muscle cardiaque et dans les muscles volontaires.

Pour voir nettement ce phénomène, il faut attendre qu'il n'y ait plus de mouvements spontanés du ventricule. On pique alors cet organe, au voisinage de son bord droit, par exemple, et l'on peut suivre la transmission de la systole ainsi provoquée jusqu'au bord gauche des ventricules. Il faut, pour cette transmission, de 1/2 seconde à 1 seconde.

Engelmann pense que la propagation du mouvement se fait, dans les muscles cardiaques, d'une cellule à l'autre, sans qu'il soit besoin d'admettre aucune influence nerveuse pour commander ces mouvements.

Il y a là une analogie nouvelle entre le cœur et les autres muscles de l'économie. On sait, en effet, que l'onde chemine dans la fibre musculaire de proche en proche, abstraction faite de toute influence nerveuse, car ce transport s'effectue sur un muscle dont les nerfs ont été tués par le curare.

Enfin, pour continuer la comparaison entre la fonction du cœur et celle des autres muscles, il semble que, de part et d'autre, le mouvement ait des caractères différents suivant

qu'il succède à une excitation du nerf moteur ou à une excitation exclusivement appliquée au muscle. Aeby a montré que si on excite le nerf moteur d'un muscle, le mouvement éclate en quelque sorte partout à la fois, au lieu de se transmettre de proche en proche en donnant lieu au phénomène de l'onde, comme cela se voit si on excite par l'une de ses extrémités le muscle d'un animal curarisé. Or, si l'on compare les mouvements spontanés du cœur à ceux que l'on provoque par des excitations locales quand les mouvements propres ont cessé, il semble que les mouvements spontanés, soumis à l'influence des nerfs intrinsèques du cœur, éclatent en divers points à la fois, au lieu de se transmettre de proche en proche, à la façon de ceux que provoque une excitation traumatique localisée.

Dans ces dernières années, d'importants travaux ont été entrepris relativement à la fonction du muscle cardiaque. C'est en Allemagne surtout, et dans le laboratoire de Ludwig, que ces études ont été faites, grâce à l'emploi de cette belle méthode des circulations artificielles qui permettent d'entretenir la fonction d'un organe isolé. Le cœur d'une grenouille, muni d'un petit manomètre inscripteur, fonctionne pendant plusieurs heures, nourri par du sérum qu'on peut additionner de diverses substances dont les effets sur les mouvements cardiaques s'accusent très-nettement. Mais il n'est besoin de parler ici que des recherches faites à l'aide de cette méthode sur l'excitabilité du cœur.

Un travail de Bowditch (1) signale des faits importants relatifs à l'excitabilité du cœur par les courants induits. L'auteur y démontre que les systoles provoquées par des courants induits croissent d'abord avec l'intensité de l'excitant; puis, que cette croissance devient de plus en plus lente, jusqu'à un degré où la force des systoles reste invariable, bien que les excitations augmentent encore d'intensité. En cela, le muscle cardiaque se comporte comme les autres muscles dont les secousses atteignent un maximum qu'elles ne dépassent point, malgré l'accroissement d'énergie des

(1) *Arbeiten aus der physiologischen Anstalt, zu Leipzig*, 1872.

excitations. Ce fait a été signalé par Fick, par Chauveau, et après eux, par tous les physiologistes.

Bowditch constate ensuite que le cœur ne répond pas toujours aux excitations qu'il reçoit, à moins que celles-ci n'aient une grande énergie. Il distingue, à ce sujet, deux sortes d'excitations : les unes, qu'il nomme *suffisantes* et qui, dans certains cas, provoquent manifestement des systoles ; les autres qui sont assez énergiques pour produire à coup sûr une systole du cœur ; il les nomme excitations *infaillibles.*

Voulant ensuite déterminer quelles sont les circonstances dans lesquelles les excitations *suffisantes* restent inefficaces, l'auteur arrive à démontrer que, sur cent excitations données au cœur, la proportion des systoles obtenues croît, non-seulement avec l'intensité des courants employés, mais aussi avec l'intervalle qui sépare les excitations.

Enfin, il signale qu'après un repos, le cœur, peu excitable dans les premiers instants, le devient graduellemeut davantage sous l'influence des excitations qu'on lui applique.

Dans ces expériences, Bowditch a côtoyé de très-près les conditions véritables qui président aux changements de l'excitabilité du cœur, et s'il ne les a pas complétement saisies, cela tient, comme on le verra plus loin, à la méthode d'inscription dont il s'est servi. C'est par la méthode de Fick que les tracés ont été inscrits. Or, dans cette méthode, on ne fait

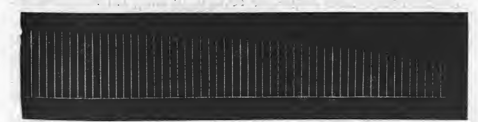


Fig. 23. — Augmentation d'énergie des systoles du cœur sous l'influence d'excitations électriques croissantes. (Cette figure se lit de droite à gauche.)

mouvoir le cylindre que dans les intervalles des mouvements que l'on veut écrire, et c'est pendant l'immobilité du cylindre que le tracé s'inscrit. Il résulte de cette méthode, qu'on obtient une série de lignes verticales pour une série d'oscillations du manomètre cardiaque, et que cette série de lignes, très-apte à faire juger des différentes amplitudes que présen-

tent les excursions de la colonne de mercure, ne donne aucune idée des phases du mouvement qui s'est produit. La figure 23 montre très-bien les variations de l'énergie ventriculaire, du commencement à la fin de l'expérience, mais elle n'indique ni le retard du mouvement cardiaque sur l'excitation qui l'a provoqué, ni les phases de ce mouvement cardiaque.

Ainsi, par la méthode de Fick, on se prive d'un grand nombre de renseignements utiles sur les caractères du mouvement que l'on inscrit. On va voir que c'est l'emploi de cette méthode que Bowditch doit accuser s'il n'a pas vu les conditions dans lesquelles les excitations *suffisantes* provoquent ou ne provoquent pas de mouvements dans le cœur qui les reçoit.

Un autre travail, relatif à l'excitabilité cardiaque, est dû à Rossbach; il a pour objet l'étude des excitations traumatiques portées sur les ventricules ou sur les oreillettes (1).

Cet auteur a signalé un phénomène fort curieux, c'est la production d'une atonie locale et temporaire dans la pointe du ventricule quand elle a reçu une forte excitation traumatique. Après cette excitation on voit, pendant une série de systoles, la région contuse rester relâchée pendant que le reste du ventricule devient pâle et dur. Cette partie contraste avec le reste de l'organe en ce qu'elle forme une petite hernie, une sorte de sac rouge dans lequel se réfugie le sang du ventricule en systole.

Ces observations semblent avoir été faites exclusivement *de visu*; ainsi, quand il s'agit d'apprécier l'influence de la phase d'une révolution cardiaque dans laquelle s'obtient tel ou tel effet des excitations traumatiques, l'auteur nous semble parfois s'être trompé. Nous reviendrons, du reste, ultérieurement sur ces expériences.

(1) Rossbach, *Beitrage zur Physiol. der Herzens, Verhandl der Phys. med. Gessellschaft Wurtzbourg*, vol. V, p. 183.

Excitations électriques appliquées au cœur pendant que celui-ci exécute ses mouvements spontanés.

A. *Influence des courants induits sur les mouvements du cœur.*

Pour obtenir des résultats bien comparables entre eux, je me suis servi exclusivement de courants induits de rupture. Or, ces excitations, bien que toujours égales entre elles, donnent naissance à des effets très-différents. Tantôt le cœur semble n'avoir pas reçu d'excitation, tantôt il réagit. Dans ces derniers cas, le mouvement apparaît tantôt avec une grande soudaineté (1/10 de seconde) et tantôt après un retard considérable (1/2 seconde et même plus.) Enfin, la systole provoquée peut être, dans certains cas, aussi forte que celles qui se produisent spontanément, tandis que, d'autres fois, elle est pour ainsi dire avortée.

En faisant un grand nombre d'expériences, j'ai pu m'assurer que, si la réaction du cœur n'est pas toujours la même, cela tient à ce que l'excitation n'arrive pas toujours au même instant de la révolution du cœur, et que si on excite le cœur toujours à la même phase de sa systole ou de sa diastole, il donne toujours la même réaction.

Voici les conditions dans lesquelles les expériences ont été faites.

La figure 24 montre une grenouille étalée sur une planchette de liége et dont le cœur est mis à nu. Cet organe est saisi, au niveau de la région ventriculaire, entre les mors d'une sorte de pince myographique formée de deux cuillerons portés chacun par un bras coudé. L'un de ces bras est fixe et l'autre, mobile, porte un levier horizontal qui lui est perpendiculairement implanté et qui, par son extrémité munie d'une plume, trace sur un cylindre enfumé. Le cuilleron mobile est rappelé par un petit fil de caoutchouc fixé à une épingle *e* et agissant comme ressort, de telle sorte que chaque systole du ventricule écarte les mors de la pince en

tendant le fil élastique, tandis qu'à chaque diastole le cœur, redevenant mou, laisse revenir le mors de la pince sous la traction du ressort.

La traction du fil de caoutchouc, suivant qu'elle est plus ou moins énergique, modifie les caractères du tracé cardiaque. Si la traction est très-forte, elle comprime énergiquement le ventricule et empêche le sang de le remplir pendant la diastole; dès lors, on n'obtient plus que les

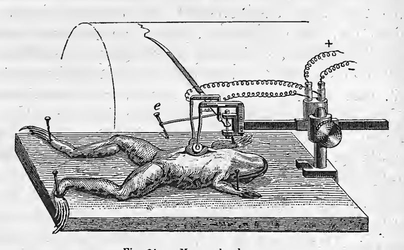


Fig. 24. — Myographe du cœur.

courbes myographiques du ventricule qui fonctionne comme dans le cas où le cœur serait isolé. Mais si la traction est faible, le ventricule effectue sa réplétion diastolique et le tracé renferme tous les détails normaux de la pulsation cardiaque.

Le tracé, figure 25, montre les transformations successives que présente le cœur d'une grenouille sous l'influence d'une

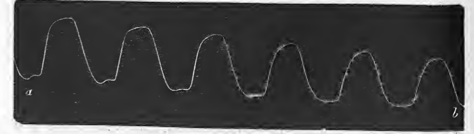


Fig. 25. — Tracés cardiaques de la grenouille sous l'influence d'une pression croissante du myographe.

traction de plus en plus énergique du fil tenseur du myographe.

Sur les tracés représentés plus loin, le lecteur reconnaîtra donc aisément, d'après la forme de la courbe, le degré de pression auquel était soumis le ventricule.

Dans le myographe qui vient d'être décrit, les cuillerons sont électriquement isolés par des pièces d'ivoire placées sur le trajet des bras qui les supportent. Chaque cuilleron est mis en rapport avec un fil métallique destiné à transmettre au cœur des excitations électriques de différentes natures. Les courants de pile ou les courants induits traverseront donc le ventricule, dans le sens transversal, en passant d'un des cuillerons à l'autre.

Enfin, pour signaler l'instant précis où se produit l'excitation électrique dont on veut connaître les effets, on dispose, au-dessous de la pointe du levier qui trace les mouvements cardiaques, la pointe d'un signal de Deprès (fig. 26), qui inscrit, avec une précision parfaite, le moment où l'excitation a eu lieu.

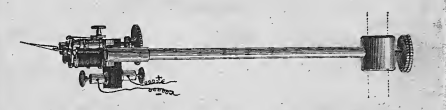


Fig. 26. — Signal de Deprés marquant l'instant des excitations électriques.

Supposons qu'on veuille appliquer au cœur une excitation par un courant induit de rupture, on fait passer à travers le signal de Deprès le courant qui traverse la bobine inductrice. Dès lors, au moment précis de la rupture du courant inducteur, le signal tracera sur le papier l'instant de cette rupture qui coïncide absolument avec la production du courant induit excitateur.

L'expérience étant ainsi disposée, on donne au cœur une excitation électrique au début d'une systole, puis, après avoir observé les effets qui se sont produits, on excite de nouveau le cœur à un moment plus avancé de sa phase systolique, puis, à un autre moment, plus tardif encore; enfin, par des

excitations successives, on explore de la même façon l'excitabilité du cœur aux différents instants de sa diastole (1).

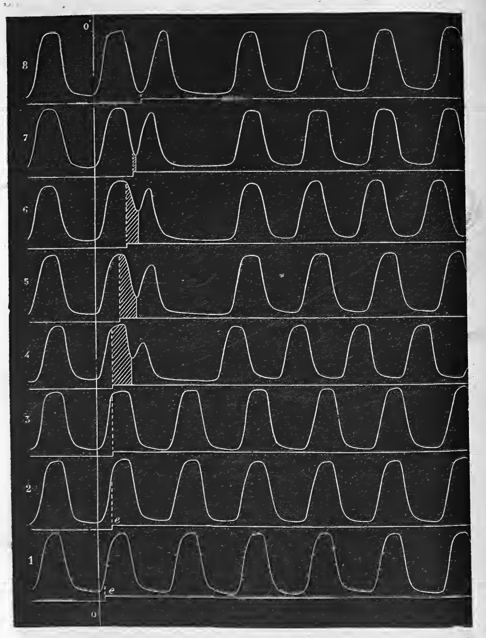


Fig. 27. — Excitations d'un cœur de grenouille à différents instants de sa révolution. La ligne O O' représente l'origine commune des révolutions cardiaques pendant lesquelles l'excitation s'est produite.

(1) J'avais d'abord essayé de provoquer, par les mouvements du cœur lui-même, les excitations qu'il reçoit; mais le dispositif compliqué, nécessaire pour obtenir cet effet, n'est pas indispensable; on s'habitue bien vite à produire l'excitation au moment voulu en se guidant sur le tracé qui s'inscrit.

La figure 27 montre ce qui se produit en certaines conditions qui seront indiquées tout à l'heure. De la ligne inférieure 1 à la ligne 3, le cœur est réfractaire aux excitations; *cette période réfractaire correspond au début de la phase systolique.* — De la ligne 4 à la ligne 8, le cœur réagit aux excitations, mais avec des rapidités bien différentes. Ce retard correspond à ce que Helmholtz appelle *temps perdu* pour les muscles volontaires. *Or, ce retard va toujours en diminuant à mesure que le cœur est excité dans une phase plus avancée de sa diastole;* très-long pour la ligne 4 où il atteint environ 1/2 seconde, il est presque nul pour la ligne 8. (Afin de rendre plus saisissable la durée de ce temps perdu, on a teinté par des hachures la partie du tracé qui s'étend depuis le moment de l'excitation jusqu'à l'apparition de la systole provoquée.)

En comparant entre elles les systoles provoquées à différents instants, on constate que *la systole provoquée est d'autant plus forte, qu'elle arrive plus longtemps après la systole spontanée qui la précède.* Il semble que le cœur qui vient d'agir ait besoin d'un repos pour réparer ses forces, nerveuses ou musculaires, et que le mouvement qui se produit est d'autant plus intense que ce repos a été plus complet.

Si l'on suit de bas en haut la série des tracés de la figure 27, on voit que l'amplitude des systoles provoquées est d'abord petite (ligne 4), puis grande (ligne 5), puis qu'elle diminue encore (ligne 6), pour grandir de nouveau (dans les lignes 7 et 8).

Ce fait ne contredit pas ce qui vient d'être dit précédemment, car si dans la ligne 6, par exemple, on voit une systole provoquée plus faible que dans la ligne qui la précède et dans celles qui la suivent, c'est que la systole de la ligne 6 est arrivée plus tôt.

Dans l'expérience ci-dessus, une double influence règle le moment d'apparition de la systole provoquée. D'une part, l'arrivée de plus en plus tardive de l'excitation électrique tend à retarder de plus en plus l'apparition de ce mouvement; mais, d'autre part, la diminution graduelle du temps perdu tend à hâter cette apparition. Suivant la prédominance de ces influences contraires, les systoles provoquées se montreront

plus ou moins tôt et leur amplitude en sera modifiée comme on le voit dans la figure 27.

Après chaque systole provoquée, il se produit un repos compensateur qui rétablit le rhythme du cœur un instant altéré. De sorte que le même nombre de systoles a lieu, soit qu'on excite le cœur, soit qu'on le laisse à son rhythme spontané. L'existence de ce repos est très-importante; elle vient confirmer une loi que j'ai cherché à établir, à savoir que *le travail du cœur tend à rester constant.* Les expériences auxquelles je fais allusion montraient que le cœur règle le nombre de ses mouvements sur les résistances qu'il doit vaincre à chacune de ses systoles; que si on élève la pression du sang dans les artères, le cœur, devant à chaque systole soulever une charge plus forte, ralentit ses battements: car chacun d'eux, constituant une plus grande dépense de travail, devra être suivi d'un plus long repos. Si, au contraire, une hémorrhagie diminue la résistance que chaque systole doit vaincre, chacun de ces mouvements représentera une moindre dépense de travail et sera suivi d'un moindre repos; le cœur accélérera donc ses mouvements.

Les expériences dans lesquelles on provoque des systoles du cœur au moyen d'excitations artificielles constituent un corollaire de la *loi d'uniformité du travail du cœur.*

Dans la figure 27, les mouvements cardiaques pendant lesquels une excitation électrique a été produite sont superposés (ligne *o o'*); les systoles spontanées qui réapparaissent après celles que l'excitation électrique a provoquées sont superposées également, de sorte que le cœur n'a été troublé dans son rhythme que pendant un temps très-court. Il n'en est pas toujours ainsi, et j'ai observé quelquefois qu'une excitation électrique du cœur en trouble les mouvements pendant un temps assez long. On observe alors une série de mouvements irréguliers qui se reproduisent périodiquement, dans un ordre toujours le même, jusqu'à ce que réapparaisse le rhythme normal. Il m'a semblé que, pour obtenir ces rhythmes irréguliers et périodiques, il fallait que l'excitation arrivât au ventricule à un instant déterminé de sa révolution, et cet instant correspondrait à celui qui sépare la systole de la diastole du

ventricule. Ces faits ont besoin d'être étudiés avec plus de soin ; je ne puis que les signaler à l'attention des expérimentateurs.

Influence de l'intensité des courants induits sur l'excitabilité du cœur. — La phase réfractaire qui a été signalée dans l'expérience précédente n'existe que pour des excitations électriques peu intenses. Elle disparaît quand on augmente l'intensité du courant induit, et reparaît de nouveau si l'intensité est diminuée. On ne peut, à cet égard, donner la valeur absolue des intensités électriques convenables pour faire paraître et disparaître la phase réfractaire, mais le tâtonnement conduit bien vite à la détermination de ces intensités (1).

Du reste, chaque cœur sur lequel on opère présente un degré particulier d'excitabilité et exige des courants induits d'intensités différentes pour présenter la phase réfractaire. On va voir que l'influence la mieux constatée pour faire varier l'excitabilité du cœur, c'est la température à laquelle cet organe est soumis.

Influence de la température sur l'excitabilité du cœur. — En répétant un grand nombre de fois l'expérience dont les résultats ont été représentés figure 27, je m'aperçus, qu'à certains jours, les cœurs de grenouille ne présentaient pas la période réfractaire, et constatai bientôt que ce phénomène tenait à une élévation de la température. La figure 28 montre un type de ce genre. On y voit que, sauf l'absence de période réfractaire, le cœur se comporte comme dans le cas précédent. Ainsi, on observe l'inégale durée du temps perdu suivant la phase de la révolution cardiaque où l'excitation est arrivée : le temps perdu étant toujours maximum, quand l'excitation arrive au début d'une systole.

(1) Si l'on se sert d'une bobine d'induction à glissière et qu'on engage assez peu la bobine inductrice dans l'induite pour que le cœur, même en diastole, ne réagisse pas aux excitations, il suffit d'engager graduellement cette bobine pour qu'à un moment donné, le cœur en diastole se montre sensible aux excitations. Qu'on applique alors ces courants induits au cœur en systole, on les trouvera sans effets sur le rhythme du cœur.

Dans le cas de la figure 28, si l'on eût diminué l'intensité des courants induits, on eût vu apparaître la phase réfractaire, ainsi que je m'en suis assuré dans des cas analogues.

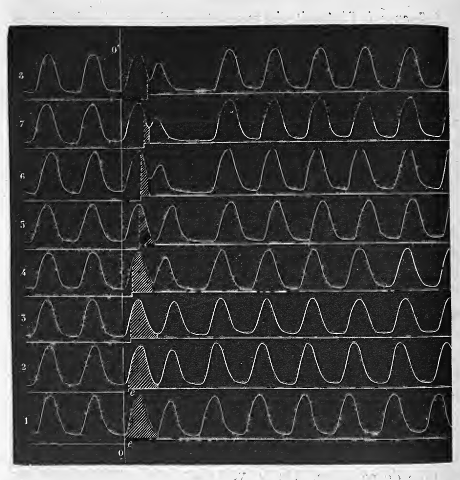


Fig. 28. — Excitations électriques d'un cœur réchauffé; l'excitation arrive à différents instants de la révolution cardiaque.

Les deux phénomènes : perte de l'excitabilité et augmentation de la durée du temps perdu, sont de même ordre, c'est-à-dire que tous deux se produisent sous les mêmes influences. Quand on étudie à l'aide du myographe un muscle quelconque, on voit que *la fatigue* diminue l'amplitude des secousses, accroît leur durée et augmente également celle du temps perdu. La même chose arrive par le refroidissement du muscle ; elle s'observe aussi quand on diminue l'intensité de l'excitant. Ainsi, les phénomènes qui viennent d'être observés à propos

du cœur le rapprochent des autres muscles et montrent que les mêmes influences augmentent ou diminuent l'excitabilité cardiaque.

D'une part, en excitant le cœur toujours au même moment de sa révolution, si l'on emploie des courants induits d'intensité décroissante, on voit s'allonger le temps perdu qui précède la systole provoquée, jusqu'à ce que le cœur soit réfractaire à l'excitation.

D'autre part, si l'on conserve la même intensité aux excitations électriques, il suffit de refroidir le cœur pour que son temps perdu augmente graduellement et que l'organe devienne enfin réfractaire aux excitations. Ces variations de l'excitabilité cardiaque s'obtiennent à volonté en plongeant les pattes de la grenouille dans un bain froid ou chaud. Sur un cœur isolé de tortue, on obtient les mêmes effets en faisant circuler dans cet organe du sang échauffé ou refroidi.

En présence de ces faits, on est conduit à se demander si les variations de l'excitabilité du cœur aux différents instants de sa révolution ne dépendraient pas de changements rhythmés de sa température. De sorte que le cœur, au moment où il présente la moindre excitabilité, soit plus froid que dans les autres instants de sa révolution. D'après certaines expériences faites sur la température du cœur au moyen d'aiguilles thermo-électriques, il m'a semblé que ces variations rhythmées de la température du cœur existent réellement et que l'ordre dans lequel elles se produisent est précisément celui que l'hypothèse ci-dessus faisait prévoir.

Influence de courants induits successifs sur le rhythme du cœur. — Au lieu de courants induits isolés dont chacun provoque dans le cœur une systole, de même qu'il provoque une secousse dans un muscle volontaire, prenons, comme excitants, des courants induits fréquemment répétés : nous constaterons, dans la manière dont le cœur réagit, une particularité remarquable.

Tandis que les muscles ordinaires se tétanisent sous l'influence de cette sorte d'excitant, ou du moins réagissent par une secousse à chaque courant induit qui les traverse, le cœur ne fait qu'accélérer le nombre de ses battements.

Supposons que le cœur donne, par son rhythme propre, un battement par seconde et qu'on lui applique des courants induits successifs au nombre de 10 par seconde; le cœur ne fera que doubler ou tripler la fréquence de ses mouvements. De sorte que, dans les conditions où un muscle ordinaire eût réagi 10 fois, le cœur ne réagit que 2 ou 3 fois.

Afin de rendre bien saisissable la manière dont les choses se passent, on a inscrit, dans la figure 29, le nombre des excitations que le cœur recevait, en même temps que le nombre des systoles qu'il effectuait. Un signal électrique traversé par le courant inducteur sert à compter le nombre des courants induits qui sont envoyés au cœur de la grenouille : chaque inflexion de la ligne inférieure crénelée correspond à la production d'un courant induit (1).

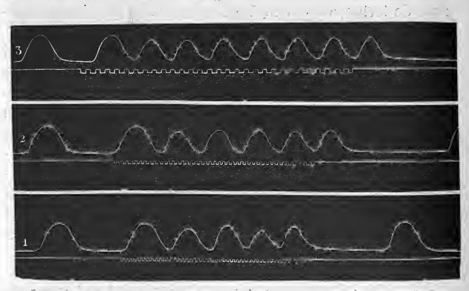


Fig. 29. — Excitations du cœur par des courants induits de rupture; le nombre de ces courants est indiqué par celui des vibrations du signal au-dessous de chacun des tracés.

La figure 29 montre une série d'expériences faites avec des courants induits d'intensité constante, mais de fréquences inégales : pour la ligne 1 les courants se répétaient 16 fois par seconde; pour la ligne 2, 14 fois; pour la ligne 3, 8 fois.

(1) En effet, à chaque fois que la ligne s'élève, c'est que le courant inducteur est rompu et que la désaimantation du fer doux abandonne le style traceur à la traction d'un ressort. Chaque fois que la ligne s'abaisse, c'est que le courant est refermé et que l'aimantation du fer doux rappelle le style malgré la tension du ressort.

Or, malgré cette différence considérable dans la fréquence des excitations, celle des systoles provoquées reste presque constante.

Ainsi, une même longueur prise sur chacune des trois lignes pendant la période d'excitations répétées contient sensiblement le même nombre de battements du cœur dans ces différents tracés, bien que la fréquence des excitations ait varié de 1 à 2.

Si la fréquence des excitations modifie peu celle des battements du cœur, il n'en est pas de même de la force de l'excitant. En augmentant l'intensité des courants excitateurs sans en faire varier le nombre, on change le nombre et le caractère des systoles provoquées.

Plus les courants induits seront intenses, plus seront nombreuses les systoles du ventricule; celles-ci arriveront même à une sorte de fusion tétanique, lorsque l'intensité des courants sera suffisante. La figure 30 donne deux types bien tranchés de cette modification des mouvements du cœur. Pour la ligne 1, la bobine peu engagée donnait des courants très-faibles; pour la ligne 2, la bobine était engagée au maximum. Or, dans les deux cas, la fréquence des excitations était la même.

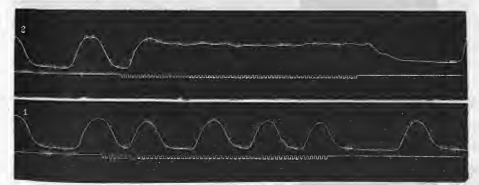


Fig. 30. — Excitations du cœur par des courants induits de même fréquence, mais de force inégale. Ligne 1, courants faibles; ligne 2, courants forts.

Dans ces deux types, on retrouve l'analogue de ce qui se produit dans un muscle ordinaire auquel on donne des secousses plus ou moins rapprochées. Tant que les secousses sont peu nombreuses, elles restent distinctes, mais dès qu'elles se rapprochent suffisamment, elles se fusionnent et



Fig. 31. — Excitations du cœur, de fréquence constante, mais d'intensité croissante d'abord, puis décroissante, comme l'exprime la courbe *a b c*.

le muscle semble être dans un état de raccourcissement permanent. Si la fusion tétanique des systoles est plus complète dans la ligne 2, c'est que le nombre de ces systoles est plus grand que dans la ligne 1.

Pour rendre le phénomène plus sensible, on a représenté, dans la figure 31, les mouvements d'un cœur qui reçoit des courants induits de fréquence croissante, mais d'intensité variable à chaque instant. A cet effet, pendant que l'interrupteur électrique vibrait avec une fréquence constante, on enfonçait la bobine inductrice dans l'induite d'une manière graduelle, afin d'accroître graduellement l'intensité des excitations, puis on retirait graduellement la bobine afin de diminuer les courants induits. On voit que de *a* en *b* (période d'accroissement de l'intensité des courants), le nombre des systoles s'est accru, tandis qu'il a diminué dans la phase suivante, de *b* en *c* (période de diminution des excitations).

Dans toutes ces expériences, on constate qu'après les périodes d'excitation, en *c*, le cœur présente un repos assez prolongé, ordinairement plus long que celui qui succède à une excitation simple.

Notons enfin que le nombre des systoles provoquées, bien que croissant avec l'intensité des courants induits successifs, n'atteint pas le nombre de ces courants. Sur ce point,

le muscle cardiaque semble donc se distinguer des autres muscles.

Toutes les particularités qui viennent d'être signalées tiennent à une cause unique : le cœur présente, à chacune de ses révolutions, une phase pendant laquelle il est réfractaire, et cette phase correspond à la systole ventriculaire. On a vu précédemment que cette hypothèse explique l'inconstance que Bowditch avait signalée relativement à la manière dont le cœur réagit à des excitations qui suffisent parfois à provoquer sa systole; elle explique également la raison pour laquelle le cœur, dans son tétanos incomplet, ne donne pas un nombre de secousses égal à celui des courants induits qui le traversent.

En effet, supposons que, 10 fois par seconde, les courants se reproduisent et que cette série d'excitations commence au moment où le cœur, étant relâché, est redevenu excitable pour les courants que l'on emploie ; le premier courant qui arrivera au cœur produira une systole et aussitôt, le ventricule devenant réfractaire, tous les courants qui lui arriveront seront non avenus pour lui, jusqu'au moment où, la systole commencée étant finie, le cœur redeviendra excitable. Alors le premier courant que le cœur recevra le mettra dans un nouvel état systolique et le rendra de nouveau réfractaire, jusqu'à la fin de cette nouvelle systole pendant laquelle une série d'excitations seront encore inefficaces, et ainsi de suite. De cette façon, sur 5 excitations appliquées au cœur, 4 par exemple, seront sans effet.

Imaginons que le nombre des excitations soit porté à 20 par seconde. La première qui trouvera le cœur excitable le mettra en systole et le rendra réfractaire à une série de 9 excitations par exemple ; la 10[e] trouvera le cœur redevenu excitable, mais le rendra aussitôt réfractaire pour une autre série de 9 excitations et ainsi de suite. On voit que, dans cette théorie, la fréquence des excitations a peu d'importance sur le nombre des systoles, le cœur ne pouvant réagir qu'à celles qu'il reçoit au moment où il est excitable.

Mais si l'intensité des courants s'accroît, le tétanos est plus complet, c'est-à-dire que le nombre des secousses du cœur se rapproche davantage de celui des excitations. Ce fait,

déjà signalé implicitement dans les expériences de Bowditch, tient à ce que, pour les excitations énergiques, la phase réfractaire du cœur diminue de durée. Au lieu de correspondre à toute la systole, elle n'en occupera que la première partie, puis le début seulement, si les courants augmentent encore d'énergie; avec une intensité suffisante du courant, la phase réfractaire disparaîtra même tout à fait. On comprend ainsi que, le nombre d'excitations non avenues diminuant sans cesse, le cœur réagisse plus souvent et s'approche du tétanos parfait, qu'il atteindra enfin si les excitations ont une intensité suffisante.

Pour la même raison, on comprend qu'un cœur chauffé soit plus complétement tétanisable qu'un cœur refroidi, attendu qu'en chauffant le cœur on diminue la durée de sa phase réfractaire.

B. *Influence des courants de pile sur les mouvements du cœur.*

Les courants de pile peuvent être appliqués de deux manières différentes : soit à titre d'excitations brèves, analogues à celles que fournissent les courants induits, soit à titre d'excitations de longue durée : courants continus.

Pour appliquer au cœur d'une grenouille des courants de pile, dont le commencement et la fin soient inscrits comme dans les expériences faites sur les courants induits, on recourt à la disposition suivante :

Le circuit de la pile se fait à travers l'appareil-signal déjà décrit et se referme au moyen d'une clef de du Bois-Reymond. De cette clef part un circuit dérivé qui se rend au cœur de la grenouille et qui, au moment où l'on ouvre la clef, fait partie du circuit principal. Dans ces conditions, si la clef est fermée, rien ne passe par le cœur, car la résistance de son tissu est infinie par rapport à celle de la clef métallique; alors le signal est traversé par le courant et le style est attiré dans la position inférieure. Dès qu'on ouvre la clef, le courant passe par le cœur de la grenouille, mais la résistance que cet organe lui présente affaiblit tellement le courant que le signal se désaimante comme si le circuit était rompu. Alors le style passe à la position supérieure, où il reste jusqu'à ce que

la clef soit fermée de nouveau et que le courant cesse de traverser le cœur pour repasser par le signal.

Quand on a soin de n'ouvrir la clef que pendant un temps très-court : 1/5 de seconde, le cœur réagit à peu près comme

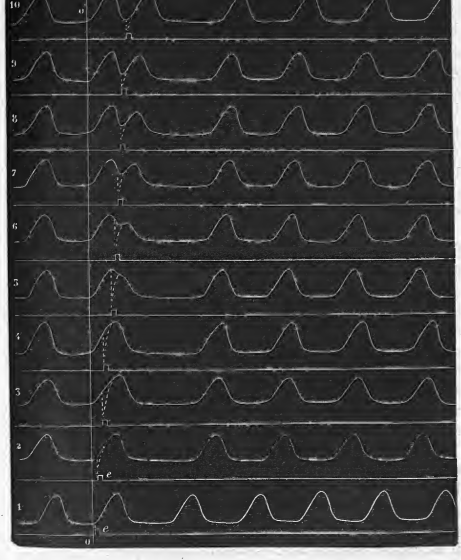


Fig. 32. — Cœur de grenouille excité par des courants de pile très-brefs et appliqués à des instants différents d'une révolution du cœur.

aux courants induits. La figure 32 montre une série d'excitations obtenues par de courts passages du courant d'un élé-

ment Daniell de grande dimension. Les excitations sont appliquées à différents instants de la révolution du cœur, comme cela a été fait dans les expériences sur les courants induits. Mais, dans ce cas d'applications brèves d'un courant de pile, on constate que la période réfractaire est absente et que le temps perdu du cœur est sensiblement le même dans tous les cas.

Il ne faudrait pas croire cependant à une action particulière du courant de pile sur le cœur. L'absence de la période réfractaire et la brièveté constante du temps perdu tiennent à ce que le courant employé était trop fort. Il suffit de mettre des résistances sur le circuit de ce courant pour en réduire l'intensité. On voit alors apparaître les phénomènes auxquels donnent naissance les courants induits, c'est-à-dire la phase réfractaire et la variation du temps perdu. Du reste, ces phénomènes varient suivant qu'on affaiblit ou qu'on augmente le courant de la pile, absolument comme ils varient pour les courants induits de forces différentes.

Si le courant de pile est continu, il se comporte comme des excitations multiples et produit une tétanisation complète ou incomplète suivant son énergie.

Or la théorie qui s'applique à l'influence des excitations induites fréquemment répétées explique également les influences du courant continu. Quand le cœur, à la suite de la clôture du courant qui le traverse, est entré en systole, il devient réfractaire, et pendant un certain temps les choses se passent comme si le courant ne le traversait pas. Puis le cœur redevient excitable et rentre dans une nouvelle systole qui lui enlève encore son excitabilité.

En somme, les effets des courants de diverses natures se rapprochent les uns des autres d'une manière très-frappante. Le cœur, de son côté, présente avec les autres muscles des analogies marquées, sauf en ce point : qu'à un moment de sa secousse qui correspond à sa période de raccourcissement il est moins sensible aux excitations électriques.

Est-il bien sûr qu'on ne trouverait pas dans tous les muscles de l'organisme une phase de moindre excitabilité? On n'en saurait répondre *a priori*, mais il sera intéressant de faire sur ce sujet des recherches spéciales, en plaçant les muscles explo-

rés dans les conditions favorables à la production de la phase réfractaire.

CONCLUSIONS.

L'excitabilité du cœur n'est pas la même aux différents instants d'une révolution cardiaque.

Une excitation unique, si elle est très-intense, provoque, il est vrai, toujours une systole du cœur, ainsi que l'a vu Bowditch ; mais si elle est faible elle ne trouve le cœur excitable qu'à certains instants.

Le cœur présente à chaque révolution une *phase réfractaire*. Celle-ci correspond au commencement de la systole des ventricules. Du reste, cette phase varie en durée suivant l'intensité de l'excitant et suivant les conditions où se trouve le cœur.

Relativement à *l'intensité de l'excitant*, on constate que si l'excitation est faible la période réfractaire dure au moins pendant toute la phase systolique ; quand l'excitation augmente de force, la phase réfractaire se réduit aux premiers instants de la systole ventriculaire, et finit par disparaître tout à fait si l'excitation devient assez forte.

Relativement aux *conditions où se trouve le cœur*, on voit que *la chaleur* abrége et peut même supprimer la phase réfractaire, tandis que *le froid* en augmente la durée. La position de cette phase, au début de la systole, tient peut-être à un abaissement de la température du cœur qui se reproduit périodiquement à la fin de chaque diastole ; cette supposition semble confirmée par certaines mesures thermo-électriques de la température cardiaque.

Les systoles provoquées artificiellement ne troublent pas sensiblement le rhythme du cœur, car celui-ci compense par un repos plus grand qu'à l'ordinaire le travail excessif qu'on lui a fait faire. Il y a là une nouvelle preuve de la tendance du cœur à travailler uniformément.

Toute systole provoquée a d'autant plus d'*amplitude* qu'elle arrive plus tard après la systole spontanée qui la précède.

Toute systole provoquée a un *temps perdu* d'autant plus court que l'excitation qui lui a donné naissance est arrivée plus tard après la systole spontanée qui la précède.

Quand une *série d'excitations électriques faibles* agit sur le cœur, la plupart de celles-ci trouvent le cœur réfractaire; aussi le nombre des systoles est-il beaucoup plus petit que celui des excitations.

On peut faire varier la fréquence des excitations faibles sans changer sensiblement celle des systoles : le cœur, dès qu'il a reçu une excitation efficace, se trouvant ramené à la phase réfractaire.

Mais si l'on fait varier l'intensité des excitations sans en changer la fréquence, comme la période réfractaire devient moins longue, le nombre des systoles s'approche de celui des excitations et peut l'atteindre, ce qui met le cœur dans un état de tétanos quand les excitations sont assez fréquentes.

Les courants de pile de courte durée se comportent sensiblement comme les courants d'induction.

Le courant *continu d'une pile*, lorsqu'il est faible, agit comme une série d'excitations discontinues et ne fait qu'accélérer le rhythme du cœur. Cela tient à ce que le courant n'agit que dans les moments où le cœur n'est pas réfractaire.

Mais un courant de pile suffisamment intense accélère davantage le rhythme cardiaque, car la période réfractaire est plus courte pour les courants forts. A un certain degré d'intensité, le courant de pile met le cœur dans un tétanos complet.

III.

EXPÉRIENCES SUR LE VOL MÉCANIQUE,

par VICTOR TATIN.

Nous essayerons d'imiter la nature et nous verrons, une fois de plus, que c'est en s'inspirant d'elle qu'on a le plus de chance de résoudre les problèmes qu'elle a résolus.

MAREY. — *La Machine animale. — Introduction.*

Avant d'exposer les résultats des expériences que j'ai faites dans son laboratoire, M. Marey me prie de raconter sommairement les recherches que j'avais entreprises depuis l'année 1874. Il tient à montrer un expérimentateur aux prises avec des difficultés sans cesse renaissantes, et pense que, de cette façon, on suit mieux l'idée générale qui a présidé à la recherche. Je me conformerai à ce plan et passerai en revue les expériences que j'ai tentées pendant ces trois dernières années.

Année 1874. — J'avais toujours regardé la solution du problème du vol mécanique comme une utopie, mais j'appris avec intérêt que plusieurs expérimentateurs étaient arrivés à quelques résultats, sinon tout à fait satisfaisants, au moins encourageants. Après avoir entendu souvent parler de ces expériences, je pensai qu'en essayant des recherches sur ce sujet j'obtiendrais peut-être aussi quelque succès.

Je me mis alors à construire moi-même un oiseau mécanique en mettant à profit l'emploi du ressort de caoutchouc tendu par torsion et déjà employé par MM. Pénaud et Hureau de Villeneuve pour le même objet (1).

(1) Mon appareil est très-petit et se compose d'un bâti en bois à l'avant duquel est placée une petite machine destinée à transformer le mouvement circulaire du ressort en deux mouvements latéraux de va-et-vient.

A cet effet, une manivelle reçoit l'effort du caoutchouc et commande une

Les essais faits au moyen de cet oiseau ont été très-satisfaisants; il prenait son vol sans aucune impulsion au départ et parcourait à peu près 15 à 20 mètres.

Malheureusement, ces petits appareils sont peu propres à faire des expériences concluantes à cause de leur petitesse et partant de l'impossibilité de saisir leurs mouvements et surtout de chiffrer leur dépense de force. Le caoutchouc se prête du reste difficilement à ces mesures, à cause de la grande inconstance de son rendement.

Jusque-là, je m'étais peu occupé du parti qu'on pouvait tirer de mes expériences et je pensais à en rester là, mais quelques personnes, des plus avancées en aviation, ayant vu fonctionner mon petit appareil, m'engagèrent vivement à continuer ces expériences, qui leur semblaient avoir déjà réalisé un progrès notable sur ce qui avait été fait précédemment. C'est à cette époque que j'eus connaissance des travaux de M. Marey sur cette intéressante question; ils me parurent très-clairs et m'ouvrirent des vues nouvelles me donnant un vif désir de faire, moi aussi, des recherches sur ce sujet.

Une des premières idées que je cherchai à vérifier fut la suivante: Il me semblait que l'oiseau, en abaissant ses ailes, n'utilise pas d'une façon complète la force qu'il dépense; que peut-être un effet de force centrifuge rejétait en dehors une partie de l'air frappé, sans profit pour la sustension.

bielle articulée sur un guide glissant entre deux colonnes; ce guide transmet son mouvement d'élévation et d'abaissement à deux petits humérus d'acier mobiles autour d'un axe horizontal commun, au moyen de deux petites bielles.

A l'arrière du bâti se trouve un crochet à cliquet qui permet de remonter le ressort sans aucun mouvement de la machine. Les ailes sont faites d'une côte de plume ébarbée et repliée en forme de raquette; le voile de l'aile est en baudruche. Cette matière légère et solide me paraît devoir être utilisée de préférence aux papiers ou étoffes que l'on avait employés jusque-là. Ces ailes sont montées sur l'appareil au moyen d'un petit tube métallique fixé à la partie forte de la plume et dans lequel pénètre l'humérus d'acier qui est cylindrique, ce qui permet un mouvement de rotation du voile autour de l'axe de l'humérus et facilite ainsi les changements d'inclinaison du plan. *Un fil partant de la nervure principale de l'aile, passant par-dessus le voile et fixé à l'arrière, accompagne l'aile dans son mouvement et en maintient le plan voisin de l'horizontale pendant l'abaissée; le voile est tout à fait libre pendant la remontée.* Une plume de queue de paon, coupée près de l'œil, est placée à l'arrière et sert de queue. Le tout pèse 5gr,15 dans lesquels sont compris 1gr,50 de ressort; l'envergure est de 0m,24.

Pour vérifier cette supposition, je construisis un appareil dans lequel deux ailes placées sur le prolongement d'une même tige pourraient s'élever et s'abaisser au-dessus du corps, en n'ayant qu'un mouvement de rotation autour de l'axe de la nervure principale, afin de pouvoir opérer les changements de plan (1). Cet appareil ne donna pas de bons résultats.

Revenant alors à mon premier type d'oiseau artificiel, je voulus me rendre compte d'un point intéressant: savoir si les bons résultats obtenus avec un petit appareil peuvent aussi être obtenus avec un grand. Je construisis, à cet effet, un oiseau dont les dimensions linéaires étaient doubles environ de celles du premier, me proposant de réaliser après celui-là d'autres appareils de plus en plus grands. Je voulais, en même temps, m'assurer s'il n'y avait pas avantage à diminuer le plus possible l'amplitude des battements, afin d'éviter l'effet de force centrifuge dont j'ai parlé plus haut, si, toutefois, cet effet se produit à un degré nuisible dans le vol des oiseaux.

Pour diminuer l'amplitude, je donnai un peu plus de longueur relative au bras de levier de la puissance et crus pouvoir employer une surface alaire plus grande; au lieu de $0^m,48$ qu'il devait avoir, je donnai au nouvel oiseau $0^m,75$ d'envergure. J'échouai complétement dans cette tentative; l'inertie de l'aile paraissait en alourdir les mouvements, et je fus obligé, pour faire voler l'appareil, de réduire l'envergure à $0^m,55$. J'avais utilisé un système de machine déjà employé avant moi par M. Pénaud, et qui a l'avantage de pouvoir être construit assez rapidement, mais qui donne des battements un peu inégaux. Je n'ai pu obtenir, avec cet appareil, que des résultats médiocres, quoique j'aie installé mes ailes de la même

(1) Je construisis à cet effet une machine au moyen de laquelle les deux ailes, réunies en une seule, pouvaient s'élever et s'abaisser ensemble tout en conservant l'horizontalité de leur grande nervure. Je nomme cet appareil: *oiseau à une seule aile*. Il n'a donné aucun résultat qui mérite d'être relaté, quoique j'en aie changé plusieurs fois l'aile et modifié quelques dispositions secondaires. Je pense, cependant, qu'il sera bon de ne pas l'oublier complétement. Il me semble qu'il y a là un bon principe, et peut-être y reviendrons-nous.

façon que dans mon premier essai. Je n'obtins qu'une douzaine de mètres environ de translation dans les meilleures expériences. Aussi abandonnai-je la construction de ces petits mécanismes, pour entreprendre immédiatement celle d'un appareil qui me semblait plus important : un oiseau mécanique portant en lui un générateur de travail.

Année 1875. — Dans les appareils construits l'année précédente, la force dépensée m'avait paru être de 3 kilogrammètres environ par seconde et par kilogramme d'appareil. En supposant exacte cette donnée, qui en vérité n'est qu'approximative, je fis le plan d'un grand oiseau qui devait peser un kilogramme, et qui serait mû par une petite machine à vapeur. Je construisis, à cet effet, une petite chaudière au moyen de cinq tubes en acier (1).

(1) Ces tubes sans assemblage sont disposés verticalement les uns devant les autres comme des quilles alignées ; le tube du milieu, plus haut que les autres, servait de dôme ; les bouts des tubes étaient foncés d'une rondelle en acier sertie ; ils étaient reliés entre eux par deux tubes horizontaux de plus petit diamètre et qui traversaient le tout, en haut et en bas. Une soupape de sûreté avec levier et ressort était au centre du dôme, et près d'elle se trouvait la prise de vapeur.

Cette chaudière était enfermée dans une enveloppe de tôle, à une distance convenable pour permettre la circulation des flammes et des gaz chauds. En avant se trouvait le foyer et en arrière une cheminée en mica.

J'éprouvai alors cette chaudière et, la trouvant suffisamment résistante, je m'occupai de la construction du reste de l'appareil.

La machine se compose d'un cylindre à simple effet, en acier, dans lequel se meut verticalement un piston fixé par sa tige à un guide sur lequel sont articulées à droite et à gauche deux pièces d'acier qui seront les *humérus* de l'oiseau. Sous chacun d'eux s'articule une bielle dont l'autre extrémité est reliée à un bâti placé sous le cylindre. Au-devant de cet ensemble est placé un petit manomètre indicateur de la pression dans la chaudière et pouvant indiquer jusqu'à 30 kilogrammes. Derrière le cylindre se trouve la distribution qui consiste en un robinet à trois voies ; la vapeur peut ainsi arriver sur le piston et produire l'abaissée des ailes. A la fin de chaque course, le robinet est tourné de 90 degrés par une tige mise en mouvement par le guide, et la vapeur qui vient de travailler peut ainsi s'échapper pendant le mouvement inverse du piston qui s'opère aussitôt que le robinet a changé de position sous la commande de la tige disposée à cet effet.

La vapeur ne devant agir que d'un seul côté du piston, le cylindre est ouvert par en haut, et la relevée des ailes se fait au moyen d'un ressort placé au-dessus de la machine.

Ce ressort est en caoutchouc; il est fixé en haut à un petit matereau et en bas à l'extrémité extérieure de l'humérus ; il est tendu par chaque abaissée

Le chauffage de la machine présenta de grandes difficultés : j'ai dû essayer successivement toutes sortes de combustibles, tels que : bois résineux, charbon de bois ou coke imbibés de liquides inflammables, mèches de coton également imbibées et jusqu'à une lampe à alcool à deux becs. C'est avec l'essence minérale et surtout avec l'éther que j'ai obtenu les moins mauvais résultats.

La surface du piston et sa course étant calculées de telle façon qu'une révolution complète des ailes correspondît à un kilogrammètre par dizaine de kilogr. de pression, je comptais donner un battement et demi par seconde à 20 kilogr. de pression, ce qui représentait les 3 kilogrammètres que j'avais jugés nécessaires.

Après bien des essais, bien des modifications plus ou moins importantes, je n'eus à constater qu'un échec complet. Je n'ai jamais pu faire produire à ma machine qu'un kilogrammètre et demi à peine.

Une plus grande production de vapeur au moyen d'une chaudière dont la surface de chauffe serait plus considérable me donnerait certainement plus de force, mais en augmentant le poids de l'appareil, de sorte que je serais toujours dans d'aussi mauvaises conditions.

J'avoue que cet échec me refroidit un peu; ma position ne me permettant pas de me livrer à ces études autant que je le désirais, je suspendis ces travaux. Mais je ne pus m'empêcher de songer à différentes combinaisons mécaniques grâce auxquelles la machine me semblait devoir voler. Ce fut bientôt une véritable obsession. « Il faut que cette machine vole, » me disais-je, et, prêt à de nouveaux sacrifices, je me remis à l'œuvre. C'était au mois de mars, et j'étais bien loin de croire que, quinze mois plus tard, après avoir surmonté bien

des ailes et produit la relevée en revenant sur lui-même, à la fin de chaque course ascendante du piston qu'il fait ainsi redescendre. Les ailes se composent d'une nervure principale en roseau et d'un voile formé d'une étoffe de coton très-légère maintenue tendue, dans le sens de sa largeur, par des côtes en bois léger. Une queue de même étoffe que les ailes est placée à l'arrière.

J'ai disposé dans cet appareil un ressort sous chaque aile afin de rappeler toujours en avant la face inférieure du voile et pour produire, pendant la remontée de l'aile, cet effet de cerf-volant qui a été souvent signalé déjà.

des difficultés, je n'aurais pas encore atteint le but désiré.

Il me sembla que, pour alléger la machine, il y avait avantage à remplacer la vapeur d'eau par un gaz comprimé. Je rejetai l'emploi de l'acide carbonique et celui de l'hydrogène, redoutant, dans le premier cas, l'entraînement de vapeurs acides qui eussent altéré les organes de la machine, dans le second, une complication et une cherté excessives du mécanisme à établir. Je m'arrêtai à l'emploi de l'air comprimé, non pas que je prétende que ce système de moteur doive être adopté pour une grande machine, mais il me semble préférable, sous bien des rapports, pour des essais en petit.

La chaudière est donc supprimée et remplacée par un récipient en tôle d'acier de même poids, je la raccorde à ma machine et je me sers du même manomètre qui existait dans ma machine à vapeur. Au-devant du récipient qui est cylindrique, avec fonds bombés, se trouve une soupape s'ouvrant de dehors en dedans et pouvant recevoir le tube qui amène l'air. Une pompe dont je dois le modèle à la complaisance de M. Paul Giffard me sert à refouler l'air dans le récipient jusqu'à 30 kilogr. de pression au besoin (1).

Comptant alors être dans les meilleures conditions possibles, je transportai le tout à la campagne, où je me proposais de faire voler mon oiseau en plein air. Espoir déçu : la machine ne vole pas ; elle va tomber assez lourdement à quelques mètres.

Cependant je modifiais toujours quelque détail : entre autres, je dois signaler la substitution de la soie au coton que j'avais employé dans la construction des ailes ; je gagnais ainsi quelques grammes, ce que je considère comme important, vu l'inconvénient qui doit résulter de l'inertie d'une aile trop lourde. Je renouvelai souvent les mêmes expériences, et à chaque fois, l'appareil en tombant se brisait quelque pièce ; il me fallait, chaque jour, faire à Paris des réparations dans la journée, et à la campagne, le soir, des expériences presque désespérantes. Enfin je vois arriver la mauvaise saison sans avoir obtenu encore de résultats satisfaisants.

(1) Pour ma sécurité, j'ai fait soumettre préalablement le récipient à 70 kilogr. de pression ; il a résisté à cet essai.

Je trouve cependant à Paris un hangar à fourrages qui est assez gracieusement mis à ma disposition et je puis encore faire quelques essais. Enfin, après avoir changé plusieurs fois la forme et la grandeur des ailes, après avoir fait fonctionner mon appareil à des pressions diverses, lui avoir fait dépenser jusqu'à 7 ou 8 kilogrammètres par seconde, je conclus que quelque grossière défectuosité doit m'échapper, le meilleur résultat m'ayant donné à peine 10 mètres de chute oblique !

M. Marey, au courant de mes essais, mit alors à ma disposition son laboratoire, ses appareils enregistreurs et enfin ses profondes connaissances sur tout ce qui touche à la question du vol et à la fonction des divers organes des oiseaux. J'acceptai avec un grand plaisir : j'allais avoir sous les yeux les intéressants graphiques obtenus avec des oiseaux vivants ; je pourrais les comparer à ceux que j'obtiendrais avec mon appareil.

« Certainement, me disais-je, on doit trouver le défaut des appareils mécaniques, » et je ne doutais pas d'arriver enfin au résultat depuis si longtemps poursuivi.

Année 1876. — Expériences faites dans le Laboratoire de physiologie de M. Marey (Collége de France).

Mon premier soin fut d'installer au centre du laboratoire un manége du plus grand rayon possible. J'employai à cet effet un lourd pied fixe, déjà disposé pour un usage analogue, et sur lequel peut s'adapter une grande pièce centrale s'embrochant sur un arbre vertical autour duquel elle peut tourner en portant, sur une plate-forme, un *cylindre* à enregistrer et des *tambours à levier*.

Je fis alors un long bras se terminant à son extrémité libre par une sorte de grande fourche dont les deux dents étaient solidement reliées entre elles, à leur pointe, par une traverse sur laquelle on peut fixer l'appareil volant au moyen d'une courroie de cuir ; cette disposition permet à l'aile qui est tournée vers le centre du manége de s'élever et de s'abaisser au-dessus et au-dessous de l'horizon sans rien heurter. Ce bras est mobile, dans le sens vertical, autour d'un axe placé sur la pièce centrale du manége, ce qui permet de le descendre jusqu'à terre en cas de besoin ; il peut aussi être

élevé à une hauteur variable selon la nécessité, au moyen d'un cordage passant sur une poulie à émerillon suspendue au plafond, au centre de la salle. L'ensemble de cet appareil étant ainsi disposé, on descend l'oiseau, on le met sous pression, puis, après l'avoir remonté à une hauteur convenable, on ouvre le robinet d'admission. Aussitôt la machine est en mouvement.

La puissance du vol est suffisante pour entraîner le manége, qui cependant est très-lourd, et l'oiseau fait ainsi dix à onze tours dans la salle. On peut alors observer à loisir les mouvements de la machine. Le manége a environ 20 mètres de circonférence, ce qui donne, pour le parcours effectué, une longueur d'au moins 200 mètres. Plusieurs expériences ont été faites ainsi, chaque jour apportant quelque modification nouvelle.

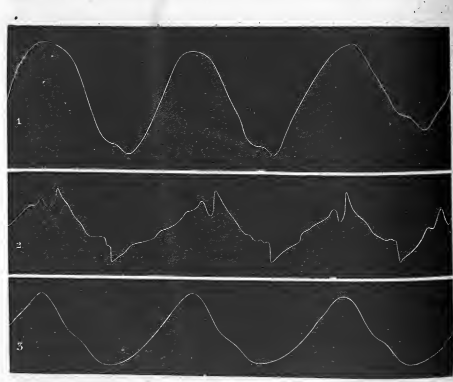


Fig. 34. — Courbes des mouvements d'élévation et d'abaissement de l'aile.
1. Courbe recueillie sur le pigeon par M. Marey.
2. Courbe d'un oiseau mécanique à ressort de caoutchouc.
3. Courbes des mouvements de l'aile de l'appareil mécanique à air comprimé. On remarque l'analogie de cette dernière avec celle obtenue sur la nature.

J'appliquai les appareils enregistreurs pour déterminer les

mouvements de l'aile de l'oiseau mécanique et je vis (fig. 34) que les mouvements de mon appareil ont beaucoup d'analogie avec ceux de l'oiseau naturel. Ces expériences ne révèlent aucun défaut qui explique pourquoi l'appareil ne peut voler lorsqu'il est libre.

Une considération m'a frappé déjà l'année dernière et me revient alors à l'esprit. Il est bien reconnu aujourd'hui que l'oiseau ne trouve à employer utilement la force qu'il déploie qu'autant qu'il agit sur des couches d'air sans cesse nouvelles, c'est-à-dire que, plus il a de vitesse, plus l'air offre de résistance sous son aile, et, par conséquent, plus le point d'appui est solide.

Or, je me souvins que cette vitesse si nécessaire manquait précisément à mon appareil, chaque fois que je le lâchais en plein air, de sorte que sa course ne répondait pas au nombre des battements. « C'est à cela que tiennent tous mes échecs. Que j'obtienne la translation rapide et j'aurai le succès! » Mais comment obtenir cette rapidité de translation?

Je repassai dans mon esprit les travaux de M. Marey, ceux de Wenham, que je ne connais pas complétement, puis l'idée si intéressante de Henson qui entraîne, au moyen d'hélices, un cerf-volant très-large et très-court ou *aéroplane*. Cet ingénieur n'a cherché qu'à donner la vitesse à son appareil; quand celle-ci est suffisante, la sustension doit s'en suivre passivement. Henson a échoué, il est vrai, mais le point de départ de ses expériences était bon; son idée a été reprise en France, depuis quelques années, et les expériences sur l'aéroplane sont conduites avec une habileté qui nous permet d'espérer un succès. Mais je ne pouvais me décider à m'écarter du plan de la nature et à munir mon appareil ailé d'un propulseur à hélice. C'est ailleurs qu'il fallait chercher le moyen d'augmenter la vitesse de translation de l'appareil.

Je crus enfin avoir trouvé le moyen d'obtenir cette vitesse horizontale. En faisant des expériences avec ces petits *appareils planeurs*, aujourd'hui bien connus, et faits d'une feuille de papier découpée en forme d'oiseau ou de toute autre forme et lestée au moyen d'une épingle ou d'un peu de cire, on constate que ces appareils peuvent avoir une vitesse de translation toute passive et qui ralentisse considérablement leur chute; il suffit,

pour cela, de placer le lest en avant du centre de sustension sur l'air. Si on place le lest trop en avant, il devient nécessaire de retrousser légèrement la queue, mais la vitesse de translation augmente ; cette vitesse est nulle, au contraire, si le centre de gravité est le même que le centre de sustension : dans ces conditions, la chute est plus rapide.

Je pensai alors à construire un petit appareil d'essai pour m'assurer du parti qu'on peut tirer de ces positions variées du centre de gravité. J'examinai aussi quelques oiseaux et je constatai que, s'il est vrai que l'articulation scapulo-humérale soit placée en avant du corps, il est bon de tenir compte de la largeur du voile emplumé, et l'on peut voir alors que le centre de sustension est, chez tous les oiseaux (ceux que j'ai pu observer du moins), placé sensiblement en arrière du centre de gravité.

C'est là, me disais-je, qu'est le nœud de la question. Le vol de l'oiseau se compose d'un seul mouvement commandé : celui de l'aile dans le sens vertical ; c'est sans doute le seul acte que l'oiseau puisse faire volontairement, le reste est passif ; l'inclinaison plus ou moins grande du plan de l'aile par rapport à l'horizon est due à la puissance avec laquelle l'oiseau abaisse ses ailes ; les plumes, flexibles elles-mêmes, sont implantées de façon à laisser fléchir leurs gaînes par l'élasticité du tissu dont elles sont formées ; cette souplesse de l'organe est plus ou moins grande aux points où il doit plus ou moins fléchir. L'oiseau qui veut voler vite agite vigoureusement ses ailes ; sa translation et sa sustension augmentent ensemble : c'est ce qui doit arriver lorsque l'oiseau est effrayé et qu'il veut fuir, ou encore au moment du départ, quand la vitesse normale n'est pas encore acquise ; mais en plein vol, il suffit sans doute à l'oiseau d'un effort bien faible pour se soutenir, puisqu'il n'a pas à ramer dans l'air pour acquérir sa vitesse ; les couches d'air inertes se présentent d'elles-mêmes sous ses ailes, et il peut s'y appuyer presque comme sur un solide. La relevée même de l'aile est peut-être passive ; en effet, puisque le voile de l'aile arrivée en bas de la course a sa face inférieure tournée en avant, on comprend aisément que la vitesse acquise de l'oiseau puisse alors, dans une certaine mesure, faire remonter l'aile. Quant aux mouvements

de l'aile d'avant en arrière, je démontre encore qu'il est aussi tout à fait passif.

M. Marey a obtenu, avec divers oiseaux, la trajectoire de la pointe d'aile, sous forme d'une courbe elliptique dont le grand axe est oblique de haut en bas et d'arrière en avant. J'ai construit un appareil dans lequel les humérus sont formés d'une lamelle d'acier, flexible dans le sens horizontal ; cet appareil ne vole pas, mais lorsqu'on fait battre ses ailes sous l'action d'un ressort, on distingue parfaitement à l'œil la figure décrite par la pointe de l'aile ; cette figure est une ellipse dont le grand axe présente à peu près la même inclinaison que dans la figure obtenue par M. Marey. Le petit axe est plus court : cela tient évidemment à ce que, dans l'oiseau vivant, le dessous du voile est toujours tourné en avant pendant la remontée, ce qui, par suite de la translation, rejette l'ensemble de l'aile plus en arrière ; tandis que dans mon appareil l'aile remontait librement, en s'effaçant derrière sa grande nervure. C'est donc à cause de la pression de l'air sous l'aile que celle-ci est projetée en avant pendant l'abaissée et en arrière pendant la remontée, par conséquent je considère ce mouvement comme passif. M. Marey avait déjà exprimé l'opinion que ces divers mouvements devaient être passifs, et je suis heureux aujourd'hui de voir mes expériences corroborer les opinions de ce physiologiste.

L'oiseau paraît aussi pouvoir, pendant le vol, accélérer sa vitesse en repliant un peu en arrière *la main* de l'aile pendant la remontée, ce qui reporte un peu plus en arrière le centre de sustension : la vitesse de translation augmente alors pour la même raison que dans le petit planeur en papier dont j'ai parlé plus haut. Pendant le plein vol, l'oiseau doit donc regagner, par les réactions verticales de son corps, la chute qu'il ferait s'il se laissait aller en planant seulement. C'est en m'appuyant sur ces diverses considérations que j'ai construit un appareil (1) représenté figure 35.

(1) Un petit bâti en bois léger est destiné à maintenir les deux extrémités du ressort, qui est toujours formé d'un ou plusieurs fils de caoutchouc tordus sur eux-mêmes. A l'avant se trouve un arbre coudé et contre-coudé de façon à faire deux manivelles en villebrequin à 90 degrés l'une de l'autre ; celle qui est le plus en avant actionne deux bielles qui commandent chacune un humé-

Le petit appareil que je viens de décrire a $0^m,33$ d'envergure et pèse 6 grammes ; il est mu par un ressort qui ne pèse que $0^{gr},60$ centigrammes, et cependant il donne un excellent vol, de peu d'étendue, il est vrai (7 à 8 mètres de parcours), mais cela me paraît suffisant, vu la petitesse du ressort, et me démontre le bon parti qu'on peut tirer des considérations que j'ai indiquées plus haut au sujet de la position du centre de gravité de l'appareil.

Encouragé par ces résultats, j'entrepris de modifier dans le même sens mon oiseau à air comprimé. Je lui fis donc de nouvelles ailes très-grandes ; je diminuai l'amplitude des battements et j'assurai le mieux possible le jeu des ressorts qui doivent produire le changement d'inclinaison du plan de l'aile. J'eus soin de placer le centre de gravité au tiers environ en avant du centre de sustension. Remettant alors la machine au manége, je constatai peu de progrès.

rus. Ces humérus qui portent les deux ailes sont mobiles autour d'un axe longitudinal commun qui peut être incliné en temps utile par une bielle mue par l'autre manivelle, de sorte que si la manivelle qui produit l'élévation et l'abaissement des ailes passe au point mort, l'autre manivelle est au point convenable pour incliner l'axe des ailes avec la plus grande vitesse ; ce moment est précisément celui pendant lequel les ailes sont, soit en haut, soit en

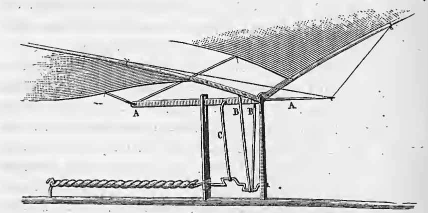


Fig. 35. — AA. Axe commun des ailes. — BB. Bielles produisant l'élévation et l'abaissée des ailes. C. Bielle produisant l'inclinaison de l'axe des ailes, ce qui donne le changement de plan.

bas de leur course, j'obtiens ainsi un changement de plan forcé. La machine est disposée de telle façon que, pendant l'abaissée, l'aile a une inclinaison oblique de 2 à 5 degrés environ, la face inférieure regardant en arrière ; et pendant la remontée, environ 35 degrés, la face inférieure regardant alors en avant. Les ailes, que les années précédentes j'avais cru devoir construire avec les matériaux les plus légers, sont ici relativement très-lourdes ; elles sont en soie

Pensant que la rigidité des attaches devait gêner les réactions tant horizontales que verticales, je disposai des intermédiaires de caoutchouc, notamment dans la suspension du bras du manége, ce qui me fournit, ainsi qu'on va le voir, un moyen de mesurer la quantité dont l'oiseau mécanique s'allége en battant des ailes.

Le bras du manége, non chargé, c'est-à-dire quand il ne porte pas l'appareil volant, s'élève au-dessus de l'horizontale d'un certain nombre de degrés ; je prends un point de repère qui me permettra tout à l'heure de retrouver cette hauteur et de voir jusqu'à quel point le bras du manége s'en approchera quand il portera l'appareil volant. On fixe alors l'oiseau mécanique sur le manége, le bras s'abaisse beaucoup sous ce poids tant que la machine n'agit pas; on fait voler la machine, et au

et représentent environ le tiers du poids total de la machine. Je n'ai pas craint de diminuer l'amplitude des battements tout en ayant un voile très-large, puisque j'étais assuré que le changement de plan s'effectuerait. Le centre de gravité est placé un peu en avant du centre de sustension et je puis le porter plus en avant encore au moyen d'un long bec en plume que je charge plus ou

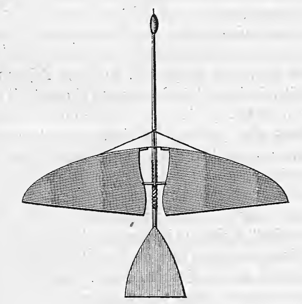


Fig. 36. — Ensemble de l'appareil vu par le dos. On remarque à l'avant le long bec en plume, chargé de cire.

moins de cire (fig. 36). Jusqu'à présent, je crois que ces dispositions n'ont pas été prises pour les appareils reproduisant le vol, et c'est peut-être la raison pour laquelle certains chercheurs, s'ils n'ont pas abandonné l'emploi d'ailes factices, leur ont du moins préféré le système de Henson.

moment où elle passe en face du point de repère, un aide marque la hauteur qu'elle atteint. On peut alors constater que ce point est sensiblement au-dessous de celui qui marque la hauteur qu'atteignait le bras du manége non chargé ; l'oiseau ne s'est donc pas allégé de tout son poids. Lorsque l'expérience est terminée, je détache l'oiseau et je le remplace par des poids que je gradue jusqu'à ce que le bras du manége ait la même hauteur que lorsqu'il portait l'appareil volant, je reconnais ainsi qu'il s'en faut de 250 à 280 grammes pour que celui-ci se soutienne seul. Depuis les dernières modifications le poids de la machine est monté à 1100 grammes environ, sans compter le poids de l'air comprimé ; elle s'allége donc, en volant, à peu près des trois quart de son poids. La dépense de force est d'environ 2 kilogrammètres par seconde, ainsi que je puis le constater par la lecture du manomètre et d'après la vitesse des battements enregistrés au moyen des appareils de M. Marey.

On remarquera, d'après les chiffres ci-dessus, que l'appareil dépense déjà moins de force que dans les premières expériences ; je ne puis lui en faire dépenser davantage, la grandeur de ses ailes lui faisant trouver sur l'air beaucoup plus de résistance qu'avec les ailes plus petites que j'employais précédemment.

J'ai fait encore avec l'appareil une autre expérience assez intéressante pour être rapportée. Je place l'oiseau sur une sorte de petit vélocipède très-léger que j'ai construit à cet effet, et composé d'un bâti porté par une grande roue en avant et deux roulettes plus petites à l'arrière, le tout pesant environ 300 grammes ; sa hauteur est telle que les ailes puissent battre sans toucher terre. Sur cet appareil, la vitesse de translation est moins grande qu'au manége et l'on observe que les réactions verticales sont assez puissantes pour que les roues de derrière soient, à chaque battement d'ailes, élevées au-dessus du sol, de sorte que, la roue de devant portant seule, l'équilibre est bientôt perdu. J'espérais que, dans ces conditions, l'appareil acquerrerait assez de vitesse pour voler librement, je fus encore trompé dans mon attente.

Il est vrai, me disais-je, que l'entraînement du chariot à roulettes, ou du bras du manége et de ses accessoires, à travers l'air doit absorber une certaine partie du travail produit par la machine, et peut-être l'appareil volera-t-il enfin lors-

qu'il sera débarrassé de ses entraves ? J'essayai de faire voler l'appareil en le lançant à l'air libre; il tomba encore, comme si je n'avais rien changé depuis les expériences de l'année précédente.

Je m'occupai alors de rechercher si l'exagération de la voilure ne serait pas nuisible, et je construisis un nouvel appareil dans lequel le rapport du poids à la voilure devait être le même que dans la nature. Je pris pour type la *huppe* du poids de 60 grammes. J'utilisai une ancienne machine motrice un peu modifiée pour sa nouvelle destination, et j'eus soin de ne pas oublier la position relative du centre de gravité. Les mouvements de cet appareil me paraissent bons et cependant il ne peut voler, les battements d'aile sont précipités, le ressort de caoutchouc s'épuise rapidement et la dépense de force est évidemment considérable. Je grandis alors un peu la voilure, mais sans plus de succès. Alors je n'hésite pas à grandir de beaucoup les ailes; une troisième paire adaptée à la machine a des proportions ordinaires comme rapport de la largeur à la longueur ; mais l'envergure a environ $0^{m}75$ au lieu de $0^{m}45$ que la nature me donnait comme exemple. Avec cette disposition, je constate un mieux sensible; les battements sont plus lents et l'oiseau paraît mieux se soutenir, mais il ne parcourt que quelques mètres, et l'on voit cependant que la force ne lui manque pas. Or cette médiocrité de résultat me parut s'expliquer par les considérations suivantes :

Lorsque l'aile remonte, le voile se masque derrière la grande nervure, et plus la vitesse de translation est considérable, plus l'inclinaison de ce voile est voisine de l'horizontalité. Or, cette vitesse n'existe pas ici; lorsque l'aile est arrivée en haut de sa course, le voile est très-oblique, il est d'ailleurs appelé à cette position par un ressort qui doit être vaincu pendant l'abaissée. Mais la grande nervure étant violemment rejetée en bas aussitôt qu'elle a atteint son maximum de hauteur, et cela sans aucun temps d'arrêt pendant lequel la translation ferait prendre au voile une position plus horizontale, il en résulte que l'aile ne prend qu'au milieu de son abaissée la position utile qu'elle doit avoir, et même, si l'amplitude des battements est petite et le voile un peu large,

il n'y aura plus du tout d'effet utile. Du moment que les ailes ne se placent pas convenablement sur l'air, l'appareil ne peut jamais avoir de translation, quelle que soit la position relative de son centre de gravité.

Il se passait certainement dans mon appareil quelque chose d'analogue, et pour m'en assurer, je construisis une quatrième paire d'ailes plus étroites et un peu plus longues, l'envergure atteint 0m,80 et la largeur 0m,10.

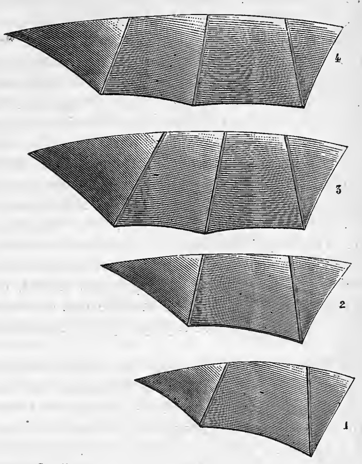


Fig. 37. — 1. Première paire d'ailes, représentant à peu près la voilure de la huppe. — 2. 2e paire : la même un peu grandie. — 3. Ailes agrandies de beaucoup. — Ces 3 paires n'ont pas donné de résultats satisfaisants.— 4. Dernière paire, avec laquelle l'appareil vole très-bien.

Dans ces nouvelles conditions, j'obtins un résultat excellent : l'appareil, dans diverses expériences, a donné des parcours variables de 20 à 30 mètres; son poids était toujours 60 grammes et celui de son ressort 15 à 16. Ainsi, la forme

de l'aile de l'oiseau est subordonnée à l'amplitude de ses battements. Wenham nous a fait voir qu'une aile peut avoir une aussi bonne fonction quand elle est étroite que lorsqu'elle est large, et M. Marey a déjà signalé ce fait que les oiseaux dont l'amplitude des battements est faible ont toujours l'aile très-longue. La nature nous montre cette disposition dans les *mouettes*, les *albatros* et la plupart des oiseaux de mer. Ces oiseaux ont généralement une voilure qui, proportionnellement, est au moins double de celle des autres, et chacun sait avec quelle facilité ils paraissent voler.

Je crois que cette aile longue et étroite est le type que l'on doit préférer; mon dernier appareil s'en rapproche plus que ceux que j'ai construits jusqu'à ce jour, et il me donne le meilleur résultat. Je dispose donc, sur mon grand oiseau à

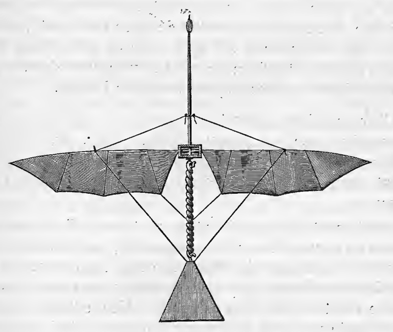


Fig. 38. — Ensemble de l'appareil qui m'a donné les meilleurs résultats. — On y remarque que l'envergure est grande relativement à la largeur du voile.

air comprimé, des ailes à peu près semblables, comme proportions, à celles qui venaient de si bien réussir, et je fais les expériences suivantes qui me semblent avoir un grand intérêt.

Le problème à résoudre est toujours celui-ci : Quelle est, en kilogrammètres par seconde, la force nécessaire pour faire

voler un poids donné? Quelque longue que soit la distance parcourue par un petit appareil, la construction de celui-ci n'a pas d'utilité si l'on ne peut estimer la force qu'il a dépensée en un certain temps; la préoccupation la plus importante n'est donc plus d'obtenir le parcours le plus étendu possible, mais d'évaluer la force qui a été dépensée dans le vol.

Revenant à mon dernier appareil, j'en remonte le ressort, d'abord très-peu, et j'essaye s'il vole. Il ne vole pas; je le remonte encore de quelques tours, et ainsi de suite, jusqu'à ce que le vol existe et que l'oiseau se soutienne sur l'air pendant quelques battements seulement, ce qui sera suffisant. Je constate ainsi que l'oiseau peut voler lorsqu'il est assez remonté pour se soulever, lorsqu'il est suspendu par l'extrême pointe de ses ailes. Si alors je remonte encore un peu le ressort, de façon à avoir quelques battements utiles de plus, je constate que l'oiseau, approché de terre au départ, peut être lancé légèment vers le sol de façon à ce que le corps et les ailes viennent y toucher; on peut le voir alors s'élever pendant quelques battements pour retomber bientôt.

Cette expérience permet de déterminer le minimum de force nécessaire pour que l'appareil puisse voler. Or, il s'agit de chiffrer cette force, et voici comment je le fais approximativement, ne pouvant pas encore en donner une mesure rigoureuse.

Il est constaté depuis longtemps, et j'ai pu l'observer moi-même au moyen de mes divers appareils, que la vitesse d'une aile est sensiblement la même pour tous les oiseaux, si l'on considère le chemin parcouru, dans un même temps, par un même point de l'aile. Cette égalité, bien entendu, n'existe qu'en plein vol et à battements continus. Ainsi, tel oiseau dont la pointe de l'aile doit parcourir un arc de cercle de 90 degrés, par exemple, et dont l'envergure sera de 1 mètre, donnera trois battements par seconde. La pointe de son aile aura fait ainsi une course de $4^{m},50$ environ dans le sens vertical, en ne tenant pas compte de la translation. Tel autre sera obligé de donner le double de battements, s'il est moitié plus petit, et ainsi de suite, de sorte que la vitesse de l'aile est toujours la même. Ceci ne peut être donné comme une loi

rigoureuse, mais il est facile de voir qu'il y a dans la nature une tendance dans ce sens.

Je prends donc mon grand oiseau et je le suspends par les extrémités de ses ailes, puis je le mets sous pression en montant graduellement jusqu'à ce qu'enfin il se soulève sous l'action de l'abaissée des ailes. Je constate alors que le manomètre marque 15 kilogrammes et je trouve, sur les graphiques obtenus au moyen des appareils enregistreurs, qu'à cette pression la vitesse des battements est d'environ 1 mètre 1/5e par seconde, ce qui correspond à 1 kilogrammètre 70. Or, l'appareil, y compris l'air comprimé, pèse maintenant à peu près 1,130 grammes, ce qui donnerait environ 50 kilogrammes de poids par force de cheval.

Lorsque j'ai dit plus haut que je ne pouvais pas encore donner une preuve rigoureuse de ces chiffres, c'est parce que, dans ces conditions, je n'ai pas encore pu faire voler mon grand oiseau. Mais, puisque les petits appareils volent tous dans ces conditions, ce dont je me suis assuré une fois de plus en construisant un petit oiseau de 12 grammes, qui donne à peu près le même résultat que le précédent avec 2gr,20 de ressort, je ne vois pas de raison pour qu'un grand oiseau ne puisse se conduire de la même façon. Or, comme le grand appareil ne se soutient pas encore d'une manière satisfaisante, je me décide à entreprendre une nouvelle série de recherches et transporte de nouveau tout mon matériel à la campagne. Je terminerai donc ici l'exposé des expériences que j'ai faites.

On remarquera que, dans tous ces travaux, je n'ai tenu aucun compte des théories plus ou moins justement basées sur les mathématiques et émises par divers auteurs. D'après ce genre de calculs on a même cru pouvoir donner des valeurs numériques ; ces chiffres, je les ai toujours considérés, à tort peut-être, comme prématurés, parce qu'aucune expérience complète et concluante n'est venue les corroborer. Les appareils volants qui ont été construits jusqu'à ce jour exigent, presque tous, des dépenses de force considérables qui ne sont pas du tout en rapport avec les théories mathématiques avancées. Mais, me dira-t-on, ces appareils sont encore imparfaits. Dans ce cas, il faut se hâter de les perfectionner suffisam-

ment, afin qu'ils puissent servir de preuve aux chiffres donnés par leurs auteurs. Il est facile, en théorie et sur le papier, de faire voler un oiseau avec une force quelconque ; mais à l'atelier, les outils en mains, on trouve les oiseaux artificiels plus récalcitrants. C'est pourquoi j'ai préféré la voie des expériences, et c'est sur elles seules que je baserai mes chiffres, si j'arrive à quelque résultat susceptible d'application.

Dans la relation de mes expériences, je n'ai pas eu la prétention de n'exposer que des idées absolument nouvelles ; je crois bien qu'en matière d'aviation tout a été dit, mais presque rien n'a été prouvé ; par conséquent, on ne peut prendre pour base les travaux contradictoires des différents auteurs. L'expérimentation doit seule servir de guide pour réaliser de nouveaux progrès.

Je ne prétends pas non plus déterminer la force que l'oiseau dépense en volant, mais ce que je dépenserai avec une machine pour imiter le vol. Certainement mes chiffres ne seront bientôt plus exacts, les perfectionnements les auront bientôt réduits; je m'en réjouirai, car alors l'aviation aura progressé. Quant à arriver aux minima qui semblent correspondre à la dépense que font les oiseaux naturels, je crois qu'il n'y faut pas songer ; mais on pourra s'en rapprocher de plus en plus. Comment l'homme arrivera-t-il jamais à imiter une aile? Cette aile, au premier aspect, semble pouvoir être remplacée par un voile mobile; mais, après un examen plus approfondi, on reconnaît une machine très-compliquée dont chaque partie a une fonction spéciale, et surtout une souplesse et une élasticité si sagement réparties qu'on doit renoncer à contrefaire une telle perfection.

Les ailes des cheiroptères, qui paraissent d'abord plus simples que celles des oiseaux, sont aussi de véritables chefs-d'œuvre de l'inimitable nature.

J'ai pu remarquer, avec mon grand appareil, qui me permet, si je le désire, de constater la dépense de force de chaque battement, que (l'appareil tournant au manége) les ailes peuvent faire une révolution complète en une seconde lorsque la pression est de 12 à 13 kilogrammes, ce qui ne fait pas 1 kilogrammètre 1/2.

Remarquons que la voilure de la machine correspond à celle d'un aigle dont les battements auraient environ la même fréquence ; on entrevoit que, si cet oiseau est supposé peser 6 kilogrammes, il lui suffit, pour voler, de dépenser le quart de son poids en kilogrammètres, autrement dit, d'élever le quart de son poids à un mètre par seconde. Cela permettrait à un oiseau naturel imaginaire, de la force d'un cheval, de peser 300 kilogrammes en plein vol. Je ne prétends pas qu'un aigle dépense aussi peu de force, pas plus qu'aucun autre oiseau ; mais je ne puis m'empêcher d'admettre que ces chiffres se rapprochent peut-être sensiblement de la vérité. M. Marey nous a montré que les muscles de l'oiseau ne sont pas susceptibles de développer un travail bien extraordinaire, qu'ils paraissent même plus faibles que ceux des mammifères. La thermodynamique, d'après le même auteur, ne nous fait pas non plus supposer une grande dépense de force de la part de l'oiseau. Enfin, à voir l'aisance avec laquelle l'oiseau semble voler et le temps fort long pendant lequel le vol peut se soutenir, on est tenté d'admettre que l'oiseau qui vole ne dépense pas proportionnellement plus de travail qu'un mammifère qui se promène, et il semble probable que cette dépense est très-faible. Si réellement la machine naturelle donne de semblables résultats, notre mécanique a encore bien des progrès à faire.

CONCLUSIONS.

L'objet des recherches qu'on vient de lire était d'imiter le mécanisme du vol de l'oiseau qui me semble être, de tous les animaux volants, celui dont le type est le plus favorable à la bonne utilisation du travail.

L'oiseau mécanique doit, comme l'oiseau véritable, avoir une double aptitude : celle de planer sans battre des ailes, en glissant sur l'air avec le moins de chute possible, et celle de se soulever contre la pesanteur.

Afin de donner à mes appareils la faculté de planer, j'ai

reconnu qu'il fallait placer le centre de gravité en avant du centre de sustension de la machine. Le point le plus favorable m'a paru situé à peu près à la réunion du tiers antérieur avec les deux tiers postérieurs de l'appareil.

Pour que l'oiseau puisse se soulever par ses coups d'aile, il faut théoriquement, d'après M. Marey, que le moment de la force motrice soit un peu supérieur à celui de la résistance de l'air, ce dernier ayant pour valeur sous chaque aile la moitié du poids de l'oiseau, multipliée par la distance qui sépare le centre de pression de l'air sur l'aile du centre de l'articulation scapulo-humérale. Mes expériences montrent que, pour les appareils mécaniques, il faut un plus grand excès de la force motrice sur la résistance de l'air. Les différents appareils que j'ai construits et qui volaient d'une manière satisfaisante ne se soutenaient sur l'air qu'à la condition de pouvoir se soulever sur un appui solide placé sous la pointe des ailes.

Peut-être cet écart entre la force théorique et la force pratiquement nécessaire existe-t-il également chez l'oiseau, dont on n'a pas encore pu mesurer la dépense de travail pendant le vol.

Les appareils que j'ai construits sont, au dire de M. Marey, les premiers appareils libres qui aient volé suivant le mécanisme propre à l'oiseau, c'est-à-dire en présentant toujours la face inférieure de l'aile à la résistance de l'air.

Je crois avoir bien établi la nécessité d'une aile longue et étroite pour rendre aussi court que possible le temps pendant lequel le voile prend la position convenable pour agir utilement sur l'air pendant l'abaissée.

Enfin, j'ai essayé de donner la mesure expérimentale du travail dépensé par une machine qui vole. J'insiste pour rappeler que de pareilles mesures ne représentent pas le minimum de dépense nécessaire, mais la dépense actuellement faite par des appareils encore imparfaits.

IV.

INSCRIPTION DES MOUVEMENTS PHONÉTIQUES,

par le Dr Ch.-L. ROSAPELLY.

Au commencement de l'année 1875, une délégation de la Société de linguistique conduite par son président, M. Vaïsse, vint trouver M. le professeur Marey, afin de savoir de lui si la méthode graphique pouvait s'appliquer à l'étude des mouvements si variés et si complexes qui se produisent dans la parole ; si elle pouvait fournir une trace objective des actes exécutés par la cage thoracique, le larynx, la langue, les lèvres et le voile du palais dans l'articulation des différents *phonèmes* (1), en indiquant la manière dont ces actes se succèdent ou se combinent suivant les différents cas.

M. Marey considéra l'entreprise comme réalisable, d'autant plus que les appareils inscripteurs qu'il emploie en physiologie ont précisément pour but d'étudier les variations d'intensité des mouvements les plus délicats et les rapports de succession d'actes multiples de nombre quelconque.

Les expériences de cardiographie avaient déjà montré les rapports de succession, de durée et d'intensité des mouvements qu'effectuent les différentes cavités du cœur. Plus récemment, entre les mains de M. Arloing et de M. Carlet, la méthode graphique avait déterminé les différents actes qui se produisent dans la déglutition. Dans l'étude de la rumination, M. Toussaint (2) avait inscrit à la fois jusqu'à

(1) Le mot *phonème* a été introduit par M. Champion, pour désigner les groupes de sons qui constituent le langage parlé.

(2) *Arch. de physiologie*, 1875, n° 2.

six actes de natures différentes ; les exigences des linguistes n'étaient donc pas excessives. Il suffisait de construire des explorateurs convenables pour chacun des mouvements dont on voulait avoir le tracé, et de relier chacun de ces explorateurs à un tambour à levier inscripteur, ainsi que cela s'est fait dans les expériences ci-dessus indiquées.

L'importance de ces études semble grande au point de vue des linguistes, dont la science chaque jour plus précise tend à prendre pour point de départ une étude expérimentale. L'étude comparée des différentes langues et celle des transformations successives que chacune d'elles a subies dans sa formation ont permis, en effet, de saisir certaines lois qu'on pourrait appeler physiologiques et qui ont présidé à l'évolution du langage.

Ainsi, le *principe de la moindre action* (1), d'après lequel tout acte humain tend à s'effectuer avec le moins d'effort possible, se montre dans le passage du latin au français et s'y traduit par l'adoucissement et même la suppression de certaines consonnes; le *principe de transition* détermine les échelons successifs par lesquels une lettre change de degré, d'ordre et de famille.

Rien n'est arbitraire dans cette évolution des langues, dont on commence à saisir les règles inflexibles. Or, pour bien apprécier les rapports de parenté entre les différents actes du langage qui tendent à se substituer les uns aux autres, il faut pousser aussi loin que possible l'analyse de chacun d'eux. L'oreille n'est pas toujours suffisante pour constater les mouvements, successifs ou simultanés, dont l'ensemble constitue un phonème, et celui qui parle n'a pas lui-même conscience des actes qu'il accomplit. C'est, en effet, par tâtonnements successifs et par essais d'imitation du langage d'autrui que, dès l'enfance, on apprend à parler ; plus tard les actes qui servent au langage sont devenus aussi inconscients que l'action des différents muscles dans la marche. Pour une seule syllabe qu'on prononce, il est parfois nécessaire d'exécuter cinq ou six actes différents dont nous ignorons souvent la succession, et dont parfois nous ne soupçonnons même pas l'existence.

(1) Voyez J. Baudry, *Grammaire comparée du sanscrit, du grec et du latin*, et A. Brachet, *Introduction du Dictionnaire étymologique de la langue française*.

Inscrire avec leurs différents caractères, leur force et leurs rapports de succession, les mouvements de l'air ou des organes phonétiques, c'est fournir au linguiste une expression matérielle de phénomènes essentiellement fugitifs que l'oreille ne peut analyser ni comparer avec certitude.

Mais il est d'autres avantages, plus précieux encore, qu'on est en droit d'attendre de l'inscription du langage. Nous voulons parler des applications de cette méthode à l'éducation phonétique des sourds-muets. Ceux qui se dévouent à rendre à ces malheureux l'usage de la parole cherchent, par tous les moyens possibles, à donner au sourd la conscience des sons qu'il émet et de ceux qu'émettent les personnes qui parlent devant lui. A défaut de l'oreille, la vue et le toucher fournissent des renseignements importants. Le sourd lit, en quelque sorte, sur les lèvres de celui qui parle ; en touchant le larynx d'une autre personne, il constate par le tact les vibrations laryngées et, appliquant ses doigts sur son propre larynx, s'exerce à émettre lui-même des sons analogues. Combien ne serait-il pas mieux renseigné sur les actes vocaux qu'il devra reproduire, s'il avait sous les yeux les tracés graphiques de tous ces actes ! il chercherait alors à imiter lui-même ces tracés, qui lui serviraient de modèle, et n'arriverait à leur parfaite imitation qu'en exécutant les mêmes actes et en émettant les sons mêmes qu'il s'agit de reproduire.

Une méthode analogue semble, *a priori*, applicable au traitement des vices de la parole. Elle serait sans doute fort utile à ces opérés qui, après une restauration du voile ou de la voûte palatine, doivent réapprendre à parler, pour perdre les défauts de prononciation que leur infirmité leur avait fait contracter.

On le voit, le problème que posait la société de linguistique peut conduire à des applications importantes et nombreuses ; aussi M. Marey s'empressa-t-il de prêter son concours à ceux qui le lui demandaient.

La commission déléguée par la société de linguistique choisit M. L. Havet, son secrétaire, pour s'associer à moi et faire, dans le laboratoire et sous la direction de M. Marey, des essais d'inscription de la parole. C'est le résultat de ces expériences qui sera exposé dans le présent mémoire. On

verra, qu'au point de vue linguistique, ces premiers essais ont déjà suffi à trancher des questions litigieuses relatives au mécanisme de la phonation.

PLAN DES EXPÉRIENCES.

Le but que nous devions atteindre dans ces expériences était de remplacer la sensation auditive par une expression objective des actes de la phonation. Sur ce point, d'importants travaux ont déjà été exécutés : sous le nom d'*acoustique des yeux*, M. Lissajoux, développant les idées de Wheatstone, a créé une méthode optique pour apprécier la combinaison des différents sons dont les accords se caractérisent par des figures géométriques constantes. Ces expériences sont trop connues pour qu'il soit nécessaire de les rappeler ici ; elles n'ont, du reste, avec notre sujet qu'un rapport indirect. Il n'en est pas ainsi des recherches relatives à l'analyse du timbre ; celles-ci nous ont appris que les sons phonétiques, désignés sous le nom de voyelles, sont constitués par un son fondamental accompagné d'harmoniques plus ou moins nombreux suivant la voyelle prononcée. Or, parmi les méthodes d'analyse qui conduisent à ces déterminations de la constitution des voyelles, l'une, celle de Helmholtz, méthode acoustique basée sur l'emploi des résonnateurs, peut être d'un grand secours pour le linguiste, mais ne saurait servir à l'éducation des sourds-muets. Celle de Kœnig, au contraire, désignée sous le nom d'analyse optique des sons, ne nécessite que l'emploi de la vue pour la détermination d'une voyelle. Les flammes vibrantes de Kœnig subissent, grâce à leur admirable mobilité, des vibrations correspondantes à toutes celles que renferment les harmoniques concourant à la formation d'une voyelle. Dissociée par sa réflexion sur un miroir tournant, la flamme apparaît comme une traînée lumineuse, bordée de dentelures dont le nombre et les hauteurs relatives permettent d'estimer la tonalité des différents sons contenus dans chaque voyelle. Placé devant le porte-voix d'un appareil de Kœnig, un sourd-muet pourra donc s'exercer à reproduire des images lumineuses pareilles à un type tracé à l'avance, et s'il réussit à imiter une de ces figures

optiques, c'est qu'il aura émis correctement la voyelle qui lui correspond.

On ne peut reprocher à cette méthode que certaines difficultés pratiques, mais avec un peu d'exercice et quelques modifications des appareils, on arriverait à la rendre d'un emploi facile. Toutefois, il reste encore un progrès à réaliser, c'est de donner la permanence aux figures optiques de Kœnig, de fixer l'image de ces flammes et d'obtenir directement la courbe caractéristique des différentes voyelles.

Le *phonautographe* de Scott inscrit, il est vrai, les tonalités diverses des sons émis dans son voisinage et même parfois des sons composés, mais il serait absolument insuffisant dans l'analyse délicate du timbre des voyelles.

L'étude des *consonnes* a été poussée très-loin par les linguistes et par les physiologistes (1) ; on trouve dans les traités classiques d'intéressantes études sur le mécanisme de la parole. Tout ce que peut donner l'observation directe de soi-même faite à l'aide de l'ouïe, de la vue et du tact, se trouve exposé avec un soin minutieux dans les traités spéciaux ; mais, chose singulière, l'étude de la phonation est encore plus parfaite dans des livres hindous qui datent de deux mille ans : les *Prâticâkhya* des Livres Védiques.

Cette perfection dans l'analyse du mécanisme de la parole tenait, chez ces Orientaux, à une idée religieuse : ils s'imaginaient qu'une prononciation défectueuse des textes sacrés constituait une profanation ; aussi avaient-ils soumis à des lois rigoureuses l'articulation des sons. Les phonétistes modernes recueillent précieusement ces analyses un peu minutieuses, mais entièrement exactes, des différentes inflexions du langage; à ces renseignements s'ajoutent ceux que l'expérimentation physiologique a déjà fournis sur les différents actes que les lèvres, la langue et le voile du palais exécutent dans la formation des consonnes. On peut, à ce sujet, signaler un ingénieux procédé expérimental de M. J. Oakley-Coles pour déterminer les différents points de contact qui s'établissent entre la langue et les parois buccales dans l'articulation des consonnes.

Ce procédé consiste à enduire d'un mélange de gomme et de

(1) On trouve un excellent résumé de ces études dans l'ouvrage du professeur Beaunis, *Nouveaux éléments de physiologie humaine*, Paris, 1876.

farine le plan supérieur de la cavité buccale, de façon que la langue, l'arcade dentaire ou la lèvre inférieure, gardent la trace du contact qu'elles ont éprouvé avec les parties recouvertes de l'enduit. En renouvelant cette expérience pour les différentes consonnes, l'auteur a obtenu des localisations très-exactes de ces contacts et les a représentés par des figures (1).

D'autre part, Czermack imagina, pour signaler les mouvements du voile du palais, de placer au devant des narines une petite glace froide et bien polie. Chaque fois que l'air s'échappe par les narines dans l'émission de consonnes nasales, on voit la glace se ternir et on obtient ainsi, sans le secours de l'ouïe, la notion des mouvements du voile du palais et de l'émission d'air qui les accompagne. On peut, avec ce contrôle, s'exercer, suivant le cas, soit à produire, soit à éviter ces mouvements.

Enfin, l'émission d'air nécessaire à la formation des sons peut se juger aisément à l'aide des appareils déjà connus et destinés à inscrire les mouvements thoraciques dans la respiration. Le *pneumographe* de Marey inscrit les phases d'ampliation et de resserrement de la poitrine et, d'après les amplitudes plus ou moins grandes des tracés qu'il fournit, exprime les différents volumes d'air qui entrent dans la poitrine ou qui en sortent (2). Cet instrument m'a permis de confirmer ce fait déjà connu, à savoir : qu'en parlant à voix basse, on dépense bien plus d'air que dans la voix timbrée. On l'a vu par ce qui précède, la nature des actes phonétiques, la localisation anatomique des contacts et dans certaines limites la caractérisation objective des différents actes du langage, sont déjà fort bien connus, mais il est un autre point dont l'étude est beaucoup plus difficile, nous voulons parler des *relations chronologiques* de ces actes, c'est-à-dire de leurs rapports de succession ou de synchronisme. L'extrême rapidité avec laquelle ces actes se succèdent, autant que la complication des manières dont ils se combinent, rendent fort difficile à juger cette partie du mécanisme de la parole.

(1) *Transact. of the odontological Society of great Britain*, 1871, new serie, vol. IV, p. 110.

(2) *Voir* dans ce volume le mémoire sur la *méthode graphique dans les sciences expérimentales*.

C'est à l'étude de ces rapports de succession que nous nous sommes attaché particulièrement, bien convaincu de trouver dans l'emploi de la méthode graphique le moyen de combler, en partie du moins, cette lacune importante. Ainsi, caractériser graphiquement chacun des actes phonétiques : vibrations du larynx, mouvements de la langue ou des lèvres, émission de l'air par les narines, telle était la première condition à remplir. Disposer les tracés de ces actes de manière à mesurer les rapports de succession et de durée était la seconde condition. Ces premières difficultés résolues, il devenait facile de juger comment les actes de la phonation se modifient, suivant la manière dont se combinent entre elles les voyelles et les consonnes.

A. *Inscription des vibrations du larynx.*

D'après les théories actuelles, le larynx émet, par ses vibrations propres, la note fondamentale d'une voyelle tandis que la résonnance du porte-voix : cavité buccale, pharynx, fosses nasales, fait naître les harmoniques. Cette théorie semble absolument démontrée par certaines expériences; nous n'en rapporterons qu'une seule. Si on produit un son continu, celui d'un diapason, par exemple, au devant de l'ouverture buccale, on peut donner à ce son le timbre d'une voyelle quelconque en donnant à la bouche la position qu'elle prend d'ordinaire pendant l'émission de cette voyelle. Ainsi il a suffi de disposer la cavité buccale comme un résonnateur de capacité convenable, pour que le son qu'elle renforce acquît les caractères d'une voyelle.

Le larynx, bien entendu, reste silencieux dans l'expérience ci-dessus mentionnée, tandis que, dans la voix parlée, c'est le larynx qui émet le son fondamental dont le résonnateur buccal détermine le timbre. En inscrivant les vibrations du larynx, on doit donc s'attendre à ne trouver que des vibrations correspondant à un son simple, malgré la complexité du son que l'oreille perçoit quand elle entend une voyelle.

Un problème assez analogue à celui que nous poursuivons a été résolu dans ces dernières années par MM. Cornu et Mercadier; il s'agissait pour eux d'inscrire les vibrations d'un ins-

trument à l'aide d'un style frottant sur un cylindre enfumé. C'est au moyen d'un fil métallique, relié d'une part au chevalet d'un violon et d'autre part au style inscripteur, que ces expérimentateurs obtinrent la transmission des vibrations sonores. M. Marey nous conseilla d'aller trouver M. Cornu, et celui-ci, avec une complaisance parfaite, nous renseigna sur les moyens de réaliser notre projet, mais il ne nous dissimula pas que les vibrations du larynx, dans la voix parlée, seraient probablement plus difficiles à transmettre que celles d'un violon et même que celles du larynx dans la voix chantée.

Nous réussîmes assez bien, dans certains cas, à inscrire les vibrations du larynx par la méthode de Cornu et Mercadier, mais l'emploi de ce mode d'inscription présentait des difficultés extrêmes ; il exigeait de la part du patient une immobilité parfaite, sans quoi le fil métallique transmettait au style inscripteur des mouvements étrangers qui dénaturaient les tracés. Il fallait chercher une méthode plus commode : car, dans les expériences que nous voulions faire, les difficultés devaient s'accroître en raison même du nombre de phénomènes qui devaient être inscrits d'une manière simultanée.



Fig. 60. — Tracés du signal électrique de M. Deprès.

Un instrument construit sur les indications de M. Marcel Deprès et capable de fournir jusqu'à 600 signaux par seconde (fig. 60), parut à M. Marey devoir répondre aux besoins de l'expérience. C'est un *signal électrique* dont la description a été déjà donnée dans le premier volume de cette publication (1). La figure 61 montre la disposition de cet instrument, dans lequel un style d'une extrême légèreté est actionné par un électro-aimant (2).

Il s'agissait d'employer les vibrations du larynx à produire

(1) *Physiol. expérim.*, Travaux du laboratoire de M. Marey, 1875, p. 143.

(2) Depuis la publication de ce travail, M. Deprès a modifié son instrument de façon à obtenir 3,000 signaux par seconde.

des clôtures et ruptures alternatives du courant électrique chargé d'actionner ce signal.

Les premiers essais que nous avions faits avec l'appareil de MM. Cornu et Mercadier nous avaient montré que les vibrations du larynx, pendant la parole, se traduisent assez nettement à l'extérieur du larynx ; fait bien connu, du reste, des physiologistes qui l'ont utilisé dans les études sur la phonation.

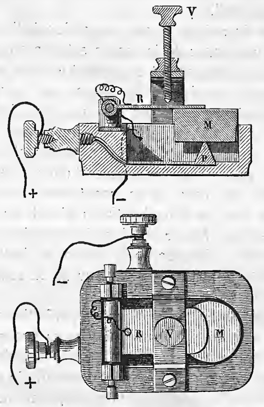


Fig. 61. — Explorateur électrique des vibrations du larynx (coupe et élévation).

Mais où trouver un interrupteur électrique assez sensible pour obéir à chacun de ces petits mouvements vibratoires? Nous avons réussi d'une manière très-satisfaisante en employant, avec quelques modifications, un appareil dont M. Marey s'était servi pour recueillir l'indication de mouvements rapides. Cet appareil est basé sur l'inertie d'une masse élastiquement suspendue; comme cette masse ne peut obéir aux mouvements rapides qui sont communiqués aux pièces

qui l'environnent, elle constitue une sorte de point fixe contre lequel une série de chocs viennent se produire. Dans notre expérience, ces chocs provoquaient une série de clôtures et de ruptures d'un courant de pile. On verra dans la figure 61 la disposition de cet explorateur électrique des vibrations du larynx.

Dans cette figure, l'appareil est représenté en coupe dans la partie supérieure, et en élévation dans la partie inférieure; les mêmes lettres désignent, dans les deux dessins, les mêmes pièces de l'appareil.

Une masse de cuivre M est suspendue à l'extrémité d'un ressort R. Au-dessous de la masse est une pointe de platine P qui se trouve exactement en contact avec la masse, de manière à fermer un circuit électrique qui passe suivant le trajet représenté par les fils marqués des signes + et —, et renferme, sur son trajet extérieur, la pile et le signal Deprès qui vient d'être décrit. La masse et la pointe sur laquelle elle repose, sont renfermées dans une petite caisse légère formée de bois et de caoutchouc durci, de façon à isoler entre eux les deux bouts du circuit de pile, sauf au point de contact de M sur P. Une vis de réglage V, appuyant sur le ressort au voisinage de la masse M, limite l'amplitude des mouvements de l'appareil autour de la masse immobile qui en occupe le centre.

Bien que M. Marey se propose de perfectionner cet appareil et d'en accroître la sensibilité, nous avons pu, avec la disposition réprésentée dans la figure 61, obtenir le tracé des vibrations du larynx dans la parole ou dans le chant. L'instrument est assez sensible pour donner, dans la limite d'une octave, le nombre des vibrations exécutées par le larynx lorsqu'on chante. La figure 62 montre un spécimen des tracés qu'on obtient ainsi.

Fig. 62. — Tracé des vibrations du larynx (672 vibrations simples par seconde).

Cette disposition répond à l'un des besoins de nos expériences: en maintenant, pendant qu'on parle, l'appareil inter-

rupteur au devant du larynx, on recueille sur un cylindre tournant une série de petits groupes de vibrations dont chacun indique l'instant où a été émis un son larynge et mesure la durée de l'émission de ce son.

B. *Inscription des mouvements des lèvres.*

L'observation montre que les lèvres exécutent, pendant l'acte de la phonation, deux ordres de mouvements: 1° des mouvements verticaux, c'est-à-dire d'élévation et d'abaissement; 2° des mouvements horizontaux ou antéro-postérieurs par lesquels les lèvres se portent plus ou moins en avant. Le type des mouvements du premier genre s'observe dans l'émission des consonnes explosives labiales comme *b* et *p*; celui des mouvements antéro-postérieurs dans l'émission de la voyelle *u*.

La figure 63 montre l'appareil explorateur des mouvements du premier ordre.

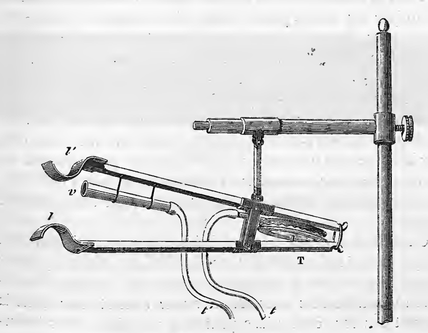


Fig. 63. — Appareil explorateur des mouvements verticaux des lèvres.

Un support vertical est placé en face de l'expérimentateur; il porte un bras horizontal au-dessous duquel pend, par l'in-

termédiaire, d'une tige doublement articulée, l'explorateur proprement dit. Celui-ci se compose de deux petites branches terminées chacune par un petit crochet plat en argent qui doit embrasser l'une des lèvres dans sa courbure. La gouttière *l'* se place sous la lèvre supérieure, la gouttière *l* sur la lèvre inférieure. Cette dernière est seule mobile ; or, quand la lèvre inférieure s'élève, elle fait basculer la branche *l* autour de son articulation, forçant ainsi les deux extrémités opposées des deux branches à s'éloigner l'une de l'autre en tendant un petit anneau de caoutchouc qui sert de ressort antagoniste.

Dans ce mouvement, une traction est opérée sur la membrane d'un tambour à air T, semblable à ceux que M. Marey emploie généralement pour les explorations des différentes sortes de mouvement. La raréfaction de l'air dans ce tambour se transmet, au moyen d'un tube de caoutchouc *t*, jusqu'au tambour à levier inscripteur qui devra tracer sur le cylindre les mouvements de la lèvre inférieure.

Dans la construction de ce petit appareil nous avons cherché à utiliser les pièces toutes faites qu'on emploie à différentes recherches physiologiques, sans nous occuper de la parfaite adaptation de l'instrument aux usages spéciaux auxquels nous le destinions. Nul doute qu'il ne soit facile de construire un appareil plus commode ; on pourrait, par exemple, mettre l'opérateur beaucoup plus à son aise en prenant le point fixe de l'appareil, non pas sur un support posé sur une table, mais sur la tête même du sujet en expérience. Ce point d'appui, on le trouverait sur une sorte de coiffure bien fixée à la tête ou, plus simplement encore, sur le nez, à la façon d'une paire de lunettes.

On voit encore dans la figure 63 un tube *t'* dont l'embouchure *v*, suspendue à l'intérieur des deux branches et en face de l'orifice buccal, est destinée à recevoir le souffle émis pendant l'articulation des différents sons. Nous avons constaté que, dans la plupart des cas, cette pièce peut être supprimée sans inconvénient.

Le levier inscripteur du mouvement des lèvres traduit l'élévation de la lèvre inférieure par un abaissement de la ligne tracée. Cette opposition du sens dans lequel la courbe s'inflé-

chit avec celui dans lequel s'exécute le mouvement des lèvres peut sembler peu logique, mais on s'habitue vite à saisir la signification de ces courbes, et ce retournement présente, ainsi qu'on le verra, certains avantages, au point de vue de la condensation des tracés sur le plus petit espace possible.

En prononçant une série de consonnes labiales, on constate que plusieurs d'entre elles se distinguent déjà par le degré de clôture plus ou moins parfait des lèvres. Dans cette émission des consonnes, il faut nécessairement intercaler des voyelles. Nous avons choisi, dans tous les cas, la voyelle *a* qui ne modifie point les phénomènes labiaux; si l'on prononce successivement les sons *apa*, *aba*, *afa*, *ava*, on reconnaît que la clôture des lèvres, complète pour le *p* et le *b*, est incomplète, au contraire, pour le *f* et le *v*. Et si deux consonnes qui exigent des degrés différents de clôture des lèvres sont émises sans voyelles intermédiaires, on trouve dans la courbe tracée un petit ressaut qui signale ce changement dans l'occlusion labiale.

La figure 64 représente quelques-uns de ces tracés qui serviront d'exemples.



Fig. 64. — Tracés des différents degrés de l'occlusion labiale correspondant à différentes voyelles.

La ligne sinueuse exprime l'ouverture des lèvres, quand elle occupe la position horizontale supérieure; elle correspond à leur clôture absolue quand elle occupe la ligne horizontale inférieure. Mais on remarque en certains points (au-dessous de *v* et de *f*) que la ligne horizontale est située moins bas, ce qui correspond à la demi-fermeture dont on vient de parler. Enfin, au-dessous de *bv*, on voit un ressaut de la ligne (au point *v*) où les lèvres passent de l'occlusion complète du *b* à la demi-occlusion du *v*.

Nous laisserons de côté ce qui est relatif aux mouvements labiaux de sens antéro-postérieur et nous nous préoccuperons exclusivement de la détermination des consonnes labiales.

Il ne suffit pas du tracé des mouvements des lèvres pour caractériser les consonnes labiales, car l'occlusion complète des lèvres existe aussi bien pour le *p* que pour le *b*, l'occlusion incomplète s'observe également pour le *v* et pour l'*f*. Mais ces quatre consonnes seront entièrement caractérisées si nous inscrivons, en même temps que le mouvement des lèvres, les vibrations du larynx. En effet, dans l'articulation du *p* et de l'*f*, le larynx est muet; il vibre, au contraire, pour le *b* et le *v*.

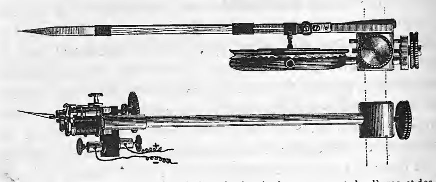


Fig. 65. — Disposition pour l'inscription simultanée du mouvement des lèvres et des vibrations du larynx.

Superposons le style du signal électrique des vibrations du larynx à celui du levier qui inscrit le mouvement des lèvres comme dans la figure 65 et faisons tracer ces deux pointes sur un cylindre à rotation lente; nous obtiendrons un double tracé qui renfermera tout ce qui est nécessaire pour caractériser ces quatre consonnes, *p*, *b*, *f*, *v*, comme on les voit figure 66.

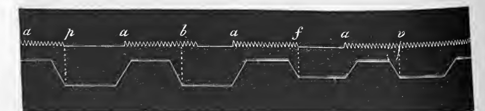


Fig. 66. — Inscription simultanée du mouvement des lèvres et de ceux du larynx.

C. *Inscription des mouvements du voile du palais.*

Les consonnes nasales *m* et *n* s'accompagnent d'une émission d'air par les narines, ce qui tient à ce que le voile du

palais s'éloigne de la paroi postérieure du pharynx au moment de l'émission de ces sons. Autant il serait difficile d'explorer d'une manière directe les mouvements du voile du palais, autant il est facile de signaler ces mouvements d'après l'échappement d'air qui en est la conséquence. A cet effet, on introduit dans une des narines un tube qui y reste à demeure et qui, relié par un tuyau de caoutchouc à un tambour à levier inscripteur, signale, par une élévation de la courbe, chacune des émissions de l'air par le nez.

En inscrivant à la fois les trois indications que nous possédons déjà : mouvement des lèvres, du larynx et du voile du palais, nous constaterons que l'*m* n'est qu'un *b* avec émission d'air par les narines, de même que nous avons vu que le *b* n'est qu'un *p* avec vibration du larynx.

Comme type de ces triples tracés, nous renverrons à la figure 67, où le lecteur trouvera, en haut, sur la série horizontale A, et sous les nos 1, 2 et 3, les tracés des groupes des phonèmes suivants : ***appa***, ***abba***, ***amma***. Il y verra, à la ligne supérieure, les tracés de la pression de l'air dans les narines indiquant si le voile du palais s'ouvre ou reste fermé. Cette ligne, absolument droite dans les deux premiers groupes (pour lesquels elle est affectée du signe —), se soulève dans le troisième, annonçant l'ouverture du voile du palais. C'est qu'en ce moment une consonne nasale *m* a été prononcée.

La deuxième ligne correspond aux mouvements du larynx. Elle est toujours pourvue de sinuosités au moment de l'émission des voyelles *a*, mais au moment de l'émission des consonnes, elle peut être dépourvue de vibrations. Ainsi (série A, colonne 1, ***ap pa***), le larynx est silencieux pendant l'émission du *p;* la ligne qui trace les vibrations est affectée du signe + pendant ***abba amma***, parce que dans l'émission du *b* et de l'*m*, le larynx présente des vibrations.

La ligne inférieure, destinée à exprimer les mouvements des lèvres, présente dans les trois cas les mêmes inflexions : c'est que le même acte labial se produit dans les trois phonèmes de la série A.

D. *Mouvements de la langue.*

Nous avons dit comment on peut localiser, avec une précision suffisante, les points où la langue s'applique, soit à l'arcade dentaire, soit à la voûte du palais. La méthode des enduits colorés donne sur ce point des renseignements précieux ; mais, pour estimer l'intensité des pressions de la langue contre les parois buccales, pour en mesurer la durée, les roulements et les rapports de succession avec les actes de la parole, il faut recourir à l'emploi de la méthode graphique, et recueillir les tracés de la langue concurremment avec ceux que nous possédons déjà. Jusqu'ici nous n'avons pas encore réussi dans ces explorations. Une voûte palatine moulée à la cire et reproduite par la galvanoplastie nous semble une base solide sur laquelle on pourra appliquer deux ou plusieurs explorateurs ; la pression de la langue sur ces explorateurs provoquera des signaux. Des tubes à air ou des fils électriques transmettront ces mouvements aux styles chargés de les inscrire.

Bien que la réalisation complète de l'inscription de la parole soit peut-être pour longtemps ajournée, nous avons voulu indiquer, dès aujourd'hui, les résultats que donnent nos premiers essais, parce que ces résultats, ainsi qu'on va le voir, éclairent déjà beaucoup le mécanisme de l'articulation de certains sons.

E. *Tracés simultanés des mouvements des lèvres, du larynx et du voile du palais.*

La figure 67 représente quinze phonèmes différents, complétement caractérisés par la méthode graphique. Pour peu qu'on en ait quelque habitude, il est extrêmement facile de lire ces graphiques, ou du moins de déterminer la consonne ou les consonnes que chacun d'eux renferme. En les décrivant tour à tour, nous désignerons chaque tracé par la série horizontale A, B, C, D, E à laquelle il appartient et par le numéro d'ordre 1, 2, 3 sous lequel il est verticalement

placé. La colonne de gauche renferme, sous le titre de *repères*,

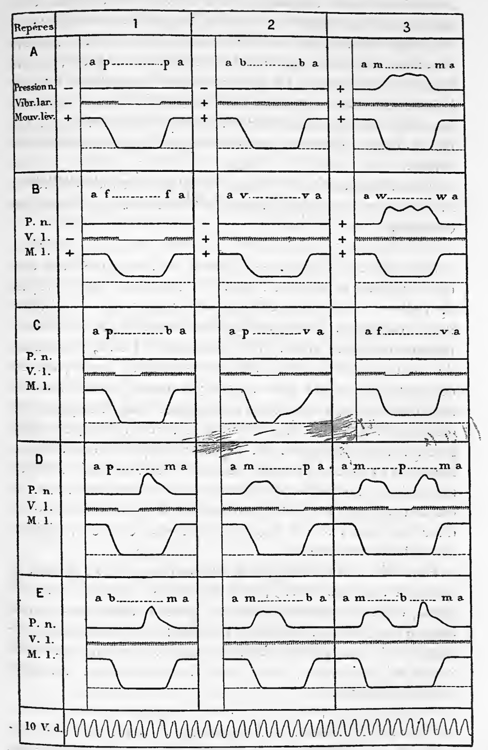


Fig. 67. — Caractères graphiques de différentes consonnes et groupes de consonnes.

l'indication explicite ou abrégée de la signification des différentes courbes de chaque tracé. Pour chacune de celles-ci, le même ordre est observé ; en haut, la *pression nasale*, soit à son degré normal qui s'observe pendant l'occlusion du voile du palais, soit élevée par l'émission d'air qui se produit quand le voile s'entr'ouvre. La ligne moyenne correspond toujours aux vibrations du larynx, elle est rectiligne quand cet organe est muet, vibrante pendant l'émission des sons laryngés. Enfin, la ligne inférieure exprime toujours les mouvements des lèvres.

Nous allons analyser successivement chacun de ces tracés ; la lecture en sera faite d'après les indications précédemment données.

Série A, n° 1. *Appa.* — Ce tracé, de même que tous ceux que renferme le tableau figure 67, commence par la voyelle *a*. Celle-ci n'est pas caractérisée elle-même ; les tracés nous indiquent seulement qu'une voyelle est prononcée puisque le larynx vibre. Mais, ainsi qu'on l'a vu, les flammes de Kœnig permettraient à un sourd-muet de copier, à l'aide des yeux, le son de cette voyelle ; le même procédé servirait au linguiste pour analyser les nuances par lesquelles passe graduellement la voyelle *a*, pour se changer en une autre voyelle, l'*e* ou l'*o*, par exemple. On voit sur le tracé que la vibration laryngée s'interrompt brusquement et d'une manière complète aussitôt que les lèvres sont fermées. Cette cessation brusque du son laryngé est l'effet naturel de la cessation du courant d'air qui faisait vibrer la glotte, or c'est à ce moment que se produit la consonne *p*.

Plus loin, lorsque les lèvres se rouvrent, il se produit de nouveau une consonne *p*, et le larynx se reprend à vibrer. Ainsi, cette consonne *explosive* se produit aussi bien par la clôture que par l'ouverture des lèvres : il y a donc physiologiquement deux sortes de *p*, et toutes les fois que cette consonne est redoublée, elle prend successivement les deux formes opposées.

Série A, n° 2. *Abba.* — Ainsi qu'on l'a déjà vu précédemment, le *b* ne diffère du *p* que par les vibrations du larynx

qui accompagnent l'émission du *b*. Dans son redoublement, cette consonne revêt, comme le *p*, les deux formes distinctes: l'une de clôture et l'autre d'ouverture des lèvres. On voit, dans la figure, que le larynx vibre pendant toute la durée du tracé, ce qui tient à ce que les deux *b* se suivent à court intervalle, mais, s'ils étaient plus distincts l'un de l'autre, on observerait un moment où le larynx est muet entre ces deux consonnes; en effet, l'occlusion des lèvres arrête promptement l'issue de l'air par le larynx. Pour comprendre comment il peut y avoir encore vibration laryngée malgré la clôture buccale et sans émission d'air par les narines, il faut remarquer que les parois buccales sont relâchées et se gonflent par l'arrivée de l'air qui s'échappe du larynx après le *b* de clôture, tandis que, dans l'émission du *p*, les parois buccales dures et tendues ne laissent pas arriver l'air du larynx et en éteignent soudainement la vibration.

Série A, n° 3. *Amma*. — Tout se passe ici comme dans le cas précédent, sauf l'ouverture du voile du palais qui produit, au moment de l'*m* de clôture, une issue de l'air par les narines. Les trois tracés présentent donc ici quelque chose de particulier. Il faut remarquer que la résonnance laryngée inhérente à l'*m* n'a pas, comme celle des consonnes précédentes, une valeur limitée ; grâce à la possibilité du passage de l'air par les fosses nasales, les vibrations du larynx peuvent se prolonger d'une manière indéfinie, aussi le redoublement de l'*m* n'est-il, à proprement parler, qu'une prolongation de la durée de cette résonnance.

Série B, n° 1. — La série B reproduit les mêmes actes phonateurs que la série A, avec cette différence que la clôture des lèvres est incomplète. L'*f* est l'homologue du *p*, à cause de l'absence des vibrations du larynx. Le *v* (n° 2) est l'homologue du *b* à cause des vibrations laryngées qui l'accompagnent.

Ces deux consonnes *f* et *v* diffèrent toutefois du *p* et du *b* par leur durée illimitée, l'occlusion incomplète des lèvres permettant à l'air de s'échapper continuellement par leur ouverture.

Enfin, dans la même série, sous le n° 3, nous avons représenté le tracé du *v* (nasalisé) comme l'homologue de l'*m*. Le son qui a donné naissance à ce tracé ne correspond pas précisément à celui du phonème généralement noté par *w*; il a une résonnance nasale. C'est en réalité un *m* prononcé sans que les lèvres se ferment d'une manière complète. Nous ne fournissons donc cette figure que pour compléter l'homologie de ces deux groupes de consonnes.

Série C, n° 1. — Dans cette série sont représentés des groupes de deux consonnes différentes et non des redoublements de la même consonne. Ainsi dans *apba* le *p* est parfaitement caractérisé par l'occlusion complète des lèvres avec silence du larynx, et le *b* par la vibration laryngée qui précède l'ouverture labiale (1).

Série C, n° 2. *Apva*. — Le *p*, caractérisé graphiquement comme dans le tracé qui précède, est suivi du *v*, consonne accompagnée de vibration du larynx avec occlusion incomplète des lèvres. La ligne inférieure présente un ressaut caractéristique dont nous avons déjà parlé précédemment.

Série C, n° 3. *Afva*. — Deux consonnes à occlusion labiale incomplète se suivent : l'une est caractérisée par le silence du larynx, c'est *f*; l'autre, le *v*, présente des vibrations laryngées.

Série D, n° 1. *Apma*. — Nous connaissions déjà les caractères graphiques de l'*m* : à savoir la triple action des lèvres, du larynx et du voile du palais. Mais, dans l'exemple que nous en avons donné précédemment, l'*m* était redoublé, c'est-à-dire prolongé, tandis que, dans le cas actuel, sa durée est très-brève.

Il n'est pas nécessaire d'entrer dans plus de détails sur l'explication des autres tracés, tous se comprennent aisément

(1) Dans ce groupe et dans les suivants où une consonne sourde précède une consonne sonore, l'oreille entend deux consonnes sonores quand on prononce les syllabes avec une certaine rapidité. Ainsi on entend *abba* pour *apba*, *abva* pour *apva* (C. n° 2) et *awa* pour *afva* (C. n° 3), sans qu'il y ait de modifications dans les tracés. Nous donnerons plus tard la raison de cette erreur de l'impression auditive.

d'après ce qu'on a déjà vu plus haut ; nous attirerons seulement l'attention du lecteur sur les figures n° 3 des séries D et E. On y trouve en effet trois consonnes successives qui se caractérisent nettement. Seulement, le double mouvement des lèvres qui devrait limiter le *p* et le *b* intercalés entre les deux *m* est remplacé par un double mouvement du voile du palais ; on ne prononce donc pas un véritable *p* ni un véritable *b* dans de telles combinaisons de syllabes, mais des consonnes analogues, dans lesquelles le voile du palais supplée les lèvres. (*Voir* plus loin l'explication des *yama* ou *jumeaux indous*.)

Tout ce que nous venons de signaler relativement à l'expression graphique des différentes consonnes s'adresse principalement à ceux qui s'occupent de l'éducation des sourds-muets, et qui pourront peut-être trouver dans l'emploi de cette nouvelle méthode un moyen d'exercer leurs élèves à reproduire certains sons d'après le contrôle de la vue. Nous ajouterons, pour terminer, quelques réflexions relatives aux applications de la méthode graphique à la linguistique expérimentale. C'est à M. L. Havet que nous empruntons les applications suivantes :

Bien que la méthode d'inscription phonétique soit encore incomplète, elle a permis déjà d'analyser certains points obscurs de la linguistique, surtout en ce qui concerne la formation des sons composés. En effet, la juxtaposition des consonnes les altère, fait de la plus haute importance pour la linguistique comparée. Ainsi, dans le passage du latin au français, le *c* simple entre deux voyelles, ou le *t* simple, également entre deux voyelles, disparaissent : *locare* devient *louer ; rota* devient *roue*. Mais, quand le latin nous présente ces deux lettres combinées dans le groupe *ct*, en français le *t* persiste, et le *c*, avant de disparaître, engendre un *i* qui lui survit et qui persiste comme un témoin du passé obscurci : *lactuca* devient *laitue ; noctem, nuit ; fructum, fruit ; directa* devient *dreite* et plus tard *droite ; stricta* devient *estreite* et plus tard *étroite*, etc. L'étude expérimentale des modifications que subissent les consonnes dans leur groupement pourra seule nous donner la clef de ces transformations.

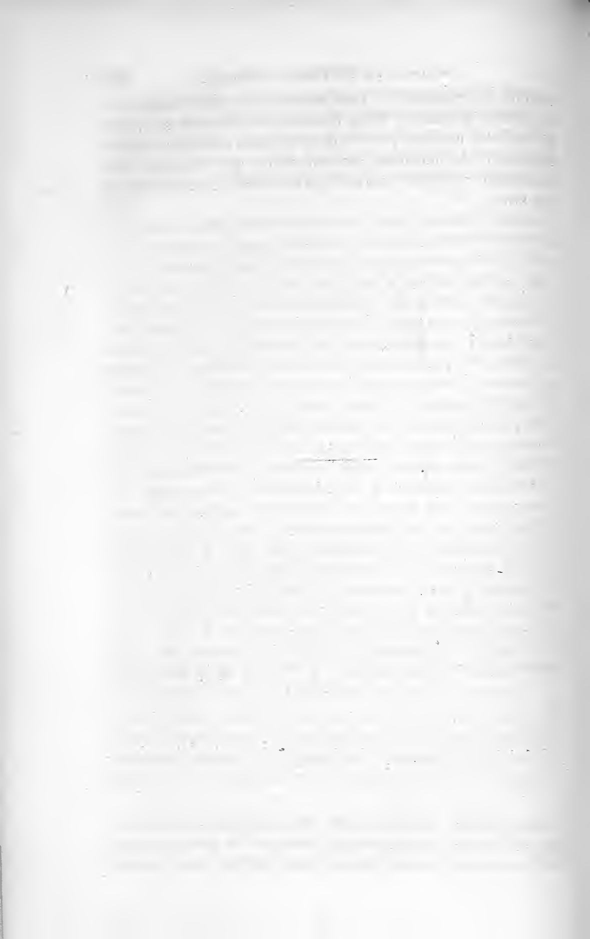
La linguistique occidentale s'est trop exclusivement occupée du mécanisme de production des consonnes isolées ; mais, ce qu'elle a négligé, les Hindous l'ont étudié avec une précision parfois minutieuse : c'est de leurs ouvrages qu'on devra s'inspirer pour instituer une série de recherches expérimentales.

Les *prâticakhya* mentionnent des sons articulés spéciaux, non représentés dans l'écriture ; ils nous apprennent que ces sons consonnantiques s'intercalent dans la prononciation, à l'intérieur des groupes tels que *kn, km, tn, tm, pn, pm, gn, gm, dn, dm, bn, bm;* c'est-à-dire à l'intérieur des groupes dont le premier élément est une des consonnes que nous appelons des *muettes*, et le second élément une consonne nasale. Le son intercalaire est considéré comme formant paire avec la muette qui précède et les Hindous l'appellent *yama* (jumeau). C'est un jumeau de la muette et non de la nasale, et pourtant les Hindous nous apprennent que le nez concourt à la production des yama. Or, pendant la formation de la consonne muette qui commence le groupe, le voile du palais est fermé ; d'autre part, il est ouvert au moment de la formation de la consonne nasale. Si le yama s'accompagne aussi d'un mouvement du voile du palais, à quel moment cette ouverture a-t-elle lieu ? Se fait-elle antérieurement à celle qui correspond à la consonne nasale, ou n'y a-t-il qu'une même ouverture du voile pour les deux sons ? La linguistique hindoue ne résout pas la question ; du reste, l'observation pure ne permet pas de dissocier ces deux actes. Mais la méthode graphique lève tous les doutes à cet égard en montrant que dans la prononciation du yama de *p* dans *apma* (série D, n° 1) le voile du palais s'ouvre avant l'acte labial qui signale l'émission dans la consonne *m*.

Les *yama*, pour n'avoir pas été bien étudiés dans les langues européennes, n'en existent pas moins dans ces langues : l'allemand comme le français les présentent, toutes les fois qu'une consonne muette se trouve placée avant une nasale.

Nous ne suivrons pas M. Havet dans les développements qu'il a donnés à la partie linguistique de ces études ; un exemple nous suffisait pour montrer quel est le rôle de la pho-

nétique expérimentale et quel secours elle peut attendre de la méthode graphique. Nous insistons, en finissant, sur l'utilité de cette méthode pour la détermination des actes physiologiques de la phonation, surtout en ce qui concerne leur succession, si rapide souvent qu'elle défie la subtilité de nos sens.



V.

LA MÉTHODE GRAPHIQUE DANS LES SCIENCES EXPÉRIMENTALES [1].

Par E. J. MAREY.

V (suite). — Applications de la méthode graphique à l'étude des mouvements simples.

Mouvement de translation d'un corps; courbe obtenue par points. — Récepteur télégraphique employé à conduire le style écrivant. — Transmission du mouvement par l'air ou par l'électricité. — Courbes expérimentales de la marche d'un train, de la vitesse d'une voiture. — Courbes des variations de fréquence des actes intermittents.

La méthode qui m'a servi à réduire l'étendue des mouvements du pied, avant de les inscrire, ne pourrait être employée si l'espace parcouru devait avoir une longueur considérable. Supposons, par exemple, qu'un wagon roule avec une vitesse de 20 mètres par seconde ; au lieu d'employer la rotation de l'essieu à faire tourner un rouage qui, à son tour, actionne une série de mobiles à vitesses décroissantes comme ceux d'un compteur, et impriment enfin au style inscripteur un mouvement réduit dans la proportion voulue, on peut recourir à une disposition plus simple, car elle n'exige à peu près aucune construction spéciale.

Au lieu de réduire le mouvement tout entier et d'en inscrire

(1) *Voir* le Ier volume 1875, p. 278.

les phases d'une manière absolument continue, on procède par action discontinue, en faisant que chaque tour de la roue du wagon imprime une impulsion légère à l'un des mobiles du compteur. Ces impulsions sont si petites et si nombreuses qu'elles se fusionnent entièrement et produisent une courbe qui semble absolument dépourvue de saccades.

Quant à la forme générale du mouvement, elle n'est altérée en aucune façon. On sait, en effet, que de grandes masses ne modifient que très-lentement la vitesse dont elles sont animées, quand elles roulent ou glissent avec peu de frottement. Dans un train de chemin de fer, les causes d'accélération et de ralentissement agissant avec une extrême lenteur, la durée d'un tour de roue différera très-peu de celle du tour suivant, et ne pourra contenir aucune variation importante de la vitesse. De sorte que si chaque tour de roue du wagon, en provoquant le passage d'une dent du rouage, fait marcher le style inscripteur, on obtiendra, par une série de saccades insensibles, plus ou moins précipitées suivant la vitesse du train, une courbe qui exprimera d'une manière fidèle l'espace parcouru à chaque instant.

On trouve tout construits, dans le commerce, des instruments qui se prêtent fort bien à ce genre d'inscription. De ce nombre est le rouage qui sert aux récepteurs télégraphiques de Bréguet. Dans ce rouage, un échappement que commande un mécanisme électro-magnétique laisse passer une dent à chaque clôture du courant et une autre dent à chaque rupture. Il suffit d'une came placée sur l'essieu d'une roue pour provoquer, à chaque tour, une clôture puis une rupture du courant. Chaque tour de roue du wagon fera passer deux dents du rouage ; cent tours de roue, c'est-à-dire environ 300 mètres parcourus, auront fait passer 200 dents, etc.

H. *Inscription d'un mouvement continu au moyen d'actions discontinues.*

Pour tracer la courbe de la marche d'un train, en donnant aux ordonnées une valeur convenable, il suffit d'actionner le style traceur au moyen d'un mobile convenablement choisi sur le récepteur. On mettra sur l'axe de ce mobile une poulie

d'un diamètre exactement calculé et celle-ci actionnera par un fil le chariot traceur, que nous connaissons déjà (1).

La rapidité avec laquelle se déplace le style traceur étant liée à celle du train lui-même, on verra la pointe écrivante se déplacer d'un mouvement accéléré au moment du démarrage et d'un mouvement diminué lors des arrêts. En outre, les rampes et les descentes se signaleront par des ralentissements et des accélérations du style (2).

On obtient de cette façon la courbe expérimentale des espaces parcourus à tout instant par un train. Sur de petits parcours, cette courbe diffère sensiblement de la courbe construite théoriquement d'après la méthode de Ibry, et dont on a vu précédemment un exemple (3).

Ces courbes qui rendent de si grands services à l'administration des chemins de fer s'écartent cependant un peu de la vérité, car elles négligent les variations de vitesse qui se produisent suivant les pentes, les arrêts et les départs. Elles supposent toujours uniforme la marche du train et l'expriment par une ligne droite qui joint l'un à l'autre deux points où le train s'arrête à des heures déterminées.

L'instrument qui vient d'être décrit s'applique également bien à toute espèce de voiture et permet de mesurer la vitesse de la traction sur différents terrains et dans différentes conditions telles que : les différents genres d'alimentation de l'animal qui traîne le véhicule, son état de fatigue ou de repos, le mode d'attelage de la voiture, la température ambiante, etc.

Sur ces divers points, le physiologiste trouvera de nombreux sujets d'études qu'on n'avait pas encore entreprises jusqu'ici dans des conditions favorables.

Les appareils ci-dessus représentés fournissent une solution possible du problème d'inscription des vitesses d'un

(1) *Voir* Ier vol., p. 264.

(2) Comme il est assez gênant de porter dans un wagon une pile et des fils électriques, on peut remplacer la transmission électro-magnétique des mouvements de l'essieu par une transmission au moyen de l'air.

Les tambours à levier conjugués constituent le principe de cette transmission. Il n'est pas nécessaire d'indiquer avec détails la disposition par laquelle la came de l'essieu actionnera l'un des tambours, et celle qui fait agir l'autre tambour sur l'échappement du récepteur.

(3) *Voir* Ier vol., p. 258.

véhicule. Mais ce n'est pas encore une solution très-facile en pratique. Les secousses de la voiture imprimeraient à ces appareils délicats des mouvements de trépidation qui altéreraient beaucoup la courbe tracée.

Pour que le style chemine avec plus de sûreté, il faut le faire conduire par une sorte d'écrou que traverse une vis tournante. Le mouvement est imprimé à cette vis par une poulie qu'elle traverse et que commande un rouage à échappement comme ceux dont il a été question tout à l'heure.

I. *Courbes des variations de fréquence des actes intermittents.*

Dans les expériences précédentes, on vient de voir comment une série d'actes successifs, inscrivant la courbe de leur fréquence, expriment ainsi la vitesse du transport d'un véhicule.

Dans certains cas, le physiologiste aurait grand intérêt à connaître les variations de certains actes, tels que la fréquence des battements du cœur, ou celle des mouvements respiratoires. Grâce aux appareils dont on vient de voir la description, il est facile d'obtenir une courbe des fréquences de ces actes, c'est-à-dire l'expression la plus nette qu'on puisse désirer. Tout se réduit à trouver un dispositif qui produise l'échappement d'une dent du rouage, soit à chaque battement du cœur ou d'une artère, soit à chaque mouvement respiratoire. Dans ces courbes, la grande fréquence des actes étudiés se traduit par un déplacement rapide du style, par une ascension plus brusque de la courbe ; la rareté de ces actes produit un mouvement plus lent, une ascension plus faible du tracé.

Nous n'insisterons pas plus longuement sur ce genre d'expériences qui seront l'objet de travaux particuliers. Du reste, on trouvera dans le chapitre VIII des courbes analogues obtenues également pour des mesures de vitesses.

VI. — Inscription des mouvements rectilignes alternatifs.

La physiologie n'offre à considérer, dans le mouvement des organes, que des déplacements alternatifs de sens inverse. — Mouvements musculaires; myographe simple; myographe à transmission.—Myographie basée sur l'inscription du gonflement musculaire et applicable à l'homme. — Pneumographe, appareil inscripteur des mouvements respiratoires. — Inscription des mouvements de la locomotion; action des membres, réactions imprimées au corps.

Les mouvements dont nous avons étudié jusqu'ici le mode d'inscription sont fort simples : non-seulement ils sont rectilignes, c'est-à-dire que le style qui les trace ne se déplace qu'en ligne droite, mais ils sont d'un seul sens, c'est-à-dire que le style écrivant ne marche qu'en avant et que, par conséquent, la courbe tracée monte d'un mouvement plus ou moins brusque, s'arrête parfois pour donner naissance à un trait horizontal, mais ne redescend jamais.

La méthode que nous venons de décrire se trouverait impuissante à représenter la plupart des mouvements qui se produisent chez les êtres animés. En effet, si la locomotion de ces êtres peut avoir lieu parfois dans une direction unique, les mouvements qui engendrent cette locomotion présentent, si on les considère en eux-mêmes, un caractère essentiellement alternatif. Par rapport au corps de l'animal, le pied avance et recule tour à tour, tandis que, sur le sol, il va toujours en avant. Le mouvement alternatif est absolument imposé à tous les organes vivants; il résulte de la nature même du tissu musculaire qui lui donne naissance (1).

Dans un écrit plein de verve et d'ingéniosité, L. Foucault

(1) Ce caractère alternatif du mouvement n'existe en général qu'au lieu même où il se produit; plus loin, transformé par diverses influences liées à l'élasticité des tissus, le mouvement revêt souvent le caractère continu, comme dans le cours du sang, ou prend l'apparence d'un mouvement moins discontinu, comme dans l'action musculaire.

a bien fait ressortir la différence qui sépare les moteurs animés des mécanismes que l'homme construit pour en faire des moteurs. Le constructeur de machines se préoccupe d'arriver le plus tôt possible au mouvement circulaire, afin d'éviter les pertes de travail que nécessite le changement de sens du mouvement de pièces plus ou moins massives; la nature, au contraire, ne procède que par mouvements alternatifs de sens inverse. Or, le constructeur a raison d'employer le mouvement circulaire, car c'est le plus favorable à l'utilisation du travail, et si la nature n'emploie que des mouvements alternatifs, c'est qu'elle ne peut faire autrement.

L'indépendance absolue des pièces d'une machine est nécessaire pour permettre le mouvement rotatif. Un axe doit être libre dans les coussinets où il tourne, tandis que, pour les besoins de leur nutrition, de leur sensibilité ou de leur dépendance des nerfs moteurs, les différentes parties du corps doivent toujours être reliées les unes aux autres. Si un organe est mobile en certains points de sa surface, s'il peut glisser dans une certaine étendue sur les organes voisins, il doit cependant toujours avoir au moins un point d'attache au reste de l'organisme, un pédicule par lequel lui arrivent les nerfs et les vaisseaux.

En outre, la production du travail moteur dans l'organisme est essentiellement discontinue. Tout muscle, après s'être raccourci, doit revenir à sa longueur première, afin de se raccourcir encore et de faire un nouveau travail. Cette alternative qui existe également dans certaines machines à vapeur ou à gaz ne peut pas, dans l'organisme vivant, être transformée en mouvement rotatif, et cela, pour les raisons dont il vient d'être parlé. L'alternance existe donc dans tous les mouvements des organes vivants; nous la retrouverons dans toutes les fonctions physiologiques.

INSCRIPTION DES ACTES MUSCULAIRES.

Les mouvements d'un muscle se composent de raccourcissement suivis d'un retour plus ou moins rapide du muscle à sa longueur première. Avec les appareils précédemment décrits.

on pourrait inscrire ces alternatives de la façon suivante. Supposons que dans le chariot inscripteur le muscle exerce une traction sur le fil qui déplace le style écrivant, un contre-poids soulevé par cet effort de traction ramènera le style en sens contraire dès que le muscle tendra à revenir à sa longueur première. On aurait ainsi, avec le chariot inscripteur, la courbe des changements alternatifs de la longueur d'un muscle. Mais, en général, ces mouvements sont étudiés sur de petits animaux, et comme l'étendue des changements de longueur d'un muscle est proportionnelle à la longueur même de cet organe, les tracés qu'on obtiendrait de cette façon seraient presque microscopiques. Pour les rendre facilement saisissables, il faut les amplifier avant de les inscrire. Dans ce but, on fait agir le mouvement exploré sur un levier qui l'amplifie plus ou moins à volonté, suivant la longueur relative qu'on donne à ses deux bras.

A. *Myographe simple.*

Sur les petits animaux, l'action musculaire s'inscrit au moyen d'un appareil à levier qu'on nomme *myographe*. Le premier appareil de ce genre fut construit par Helmholtz. Mais dans sa disposition primitive, le myographe n'inscrivait pas fidèlement le mouvement exécuté par le muscle (1).

Tous les anciens appareils inscripteurs employés en physiologie avaient un défaut commun : la pointe traçante était reliée à des pièces massives qui présentaient des oscillations propres, de sorte que la courbe tracée ne reproduisait pas fidèlement les mouvements qu'il s'agissait d'inscrire.

J'ai dit ailleurs (2) la disposition que j'ai donnée au myographe, j'ai représenté et analysé les courbes qu'il fournit pour les différentes espèces de mouvements musculaires ; je puis donc me borner ici à rappeler dans la figure 68 la disposition du myographe simple et fournir, dans la figure 69, un exemple des tracés que donne un muscle de grenouille soumis à des excitations sucessives. En bas sont les premières secousses, la fatigue allonge peu à peu la durée de ces mouvements.

(1) Voy. Marey, *Du mouvement dans les fonctions de la vie*, p. 223.
(2) *Loc. cit.*, p. 133.

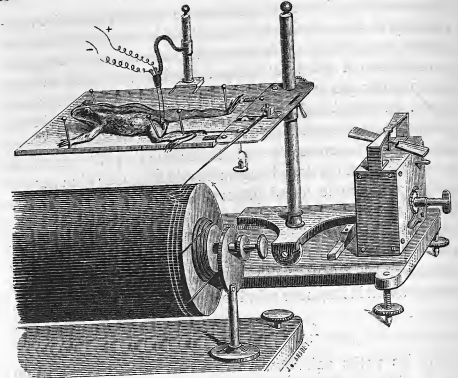


Fig. 68. — Myographe simple disposé pour inscrire une série de secousses d'un muscle de grenouille.

Mais je dois signaler une disposition nouvelle que j'ai donnée au myographe et qui me semble destinée à rendre de grands services à la physiologie, je veux parler du *myographe à transmission.*

Cet appareil réalise une grande simplification de la myographie, puisqu'il permet d'obtenir des courbes musculaires au moyen d'un instrument : *le tambour à levier* qui sert déjà à un grand nombre d'usages. Voici la disposition de l'expérience.

B. *Myographe à transmission.*

Cet appareil est représenté, vu d'en haut, figure 70. La grenouille, fixée au moyen d'épingles sur une planchette de liége, a son tendon d'Achille relié au levier d'un tambour (1). Celui-ci est établi avec la planchette sur un support commun.

(1) Habituellement je donne au levier de cette sorte de tambour (levier explorateur) plus de solidité qu'à celui des appareils inscripteurs qui doivent être essentiellement légers.

Un tube de transmission par l'air relie ce tambour à celui qui

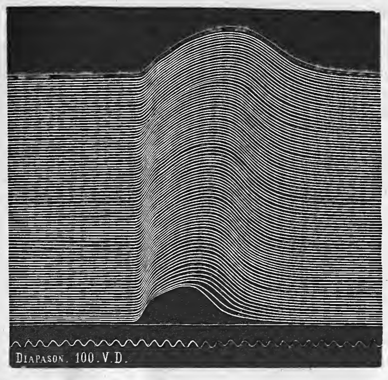


Fig. 69. — Secousses d'un muscle de grenouille imbriquées verticalement. De bas en haut s'observent les effets de la fatigue. — En bas de la figure, le tracé d'un diapason chronographe de 100 vibrations doubles sert à estimer la durée des actes musculaires.

inscrira les actes musculaires; cette transmission ne diffère en rien de celle que nous avons représentée déjà (1).

Chaque raccourcissement du muscle, faisant presser le levier contre la membrane, expulse une certaine quantité d'air du tambour explorateur dans le tambour inscripteur.

On envoie ainsi à distance le mouvement d'un muscle et ce mouvement donne des courbes identiques à celle du myographe simple. Or, pendant que le mouvement s'inscrit, l'animal peut être placé dans toutes les attitudes : il peut être plus ou moins éloigné des appareils inscripteurs, on peut le placer dans une enceinte à différentes températures, le plonger dans certains liquides ou certains gaz. Tout cela était à peu près irréalisable avec l'ancien myographe à inscription directe.

(1) Vol. 1875, p. 130.

Il ne sera pas question ici de la manière de sensibiliser ou de désensibiliser le myographe à transmission, afin de donner aux courbes musculaires les dimensions les plus convenables. Tous ces détails trouveront leur place dans un chapitre spécial destiné à la technique de la méthode graphique. Il en sera de même au sujet des moyens de disposer les tracés de façon à en faire tenir le plus grand nombre possible dans un petit espace.

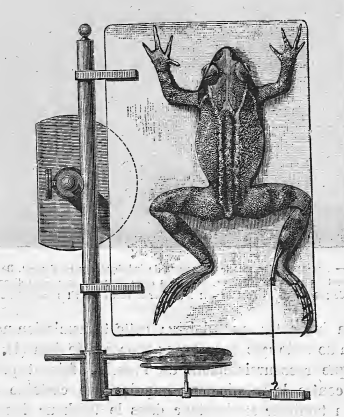


Fig. 70. — Myographe à transmission; appareil explorateur. Un muscle de grenouille exerce, par son tendon, une traction sur un tambour à levier.

Mais je ne saurais trop insister sur la nécessité absolue d'inscrire la courbe musculaire d'une manière complète, c'est-à-dire avec les différentes phases du mouvement.

Le professeur Fick a cru faire une simplification utile dans certains cas, en réduisant le tracé du myographe à une ligne verticale dont la hauteur exprime l'amplitude du raccourcissement musculaire. Ce résultat s'obtient en recueillant le tracé myographique sur un cylindre immobile qu'on déplace seule-

ment, dans l'intervalle des mouvements, d'une très-petite quantité pour empêcher les traits de se confondre.

La figure 71 montre un exemple de ce genre d'inscription.

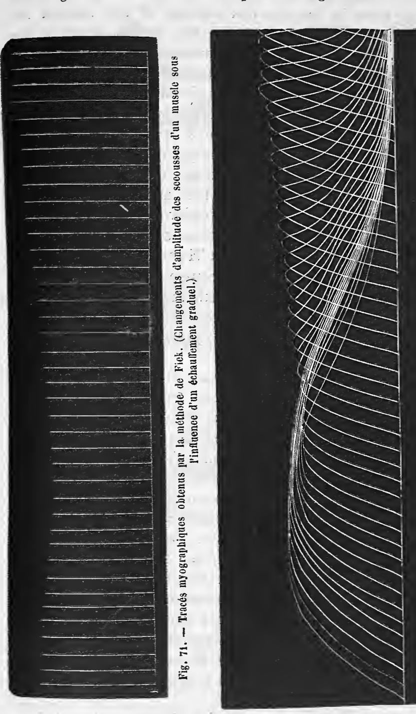


Fig. 71. — Tracés myographiques obtenus par la méthode de Fick. (Changements d'amplitude des secousses d'un muscle sous l'influence d'un échauffement graduel.)

Fig. 72. — Tracés myographiques recueillis en entier grâce à l'imbrication des courbes successives. Ce tracé correspond à l'échauffement graduel d'un muscle, comme dans le cas précédent. Non-seulement l'amplitude des secousses change, mais aussi leur forme et leur durée.

Assurément on voit très-bien, dans cette figure, les différences d'amplitude que présentent successivement les mouvements recueillis ; on suit les déplacements qui peuvent survenir dans la hauteur des maxima et des minima des tracés. Mais on n'a aucune idée des durées relatives que présentent les phases du raccourcissement du muscle et du retour de celui-ci à sa longueur première, et si quelque accident se produit dans le mouvement d'ascension ou de descente de la courbe, ce caractère échappe à l'observation.

Réduire la méthode graphique à la seule inscription de l'étendue d'un mouvement, c'est se priver de renseignements utiles, sans rien gagner en échange, car dans les courbes musculaires complètes, on peut tout aussi bien estimer les amplitudes relatives de plusieurs mouvements successifs. La figure 72 représente, dans leurs phases complètes, les mouvements qui étaient exprimés figure 71 par la méthode de Fick; elle montre comment varie la secousse d'un muscle de grenouille sous l'influence d'un échauffement graduel.

C. *Myographe inscrivant le gonflement des muscles.*

Mais il est un autre moyen de recueillir le mouvement d'un muscle : il consiste à prendre, comme force motrice, appliquée au levier du myographe, non plus le raccourcissement, mais le gonflement de cet organe. Il est bien reconnu aujourd'hui que tout raccourcissement musculaire s'accompagne d'un gonflement correspondant, car le muscle ne fait que changer de forme, et garde, sensiblement du moins, la même densité, qu'il soit en contraction ou en relâchement.

Utiliser le gonflement d'un muscle pour en inscrire les mouvements, c'est améliorer beaucoup les conditions de la myographie. En effet, ce procédé, permettant d'agir sur un muscle sans mutilation, fournit nécessairement des résultats meilleurs, puisque le muscle exploré se trouve dans des conditions d'intégrité parfaite. En outre, et c'est le principal avantage de cette sorte de myographie, elle permet d'étudier la fonction musculaire sur l'homme et se prête à toutes sortes de recherches de physiologie et de clinique.

Les figures 73 et 74 montrent le principe sur lequel s'ap-

puient les deux sortes de myographie. Dans la première, on voit le levier du tambour explorateur tiré de haut en bas par le tendon d'un muscle dont l'attache osseuse serait fixée par

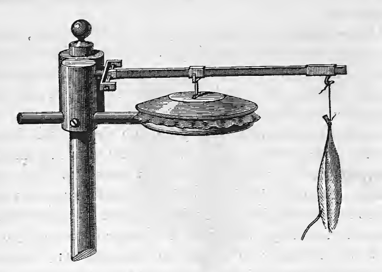


Fig. 73. — Théorie du myographe qui inscrit le raccourcissement du muscle.

un procédé quelconque. Dans la seconde, le levier, muni d'un bouton métallique, presse sur le muscle qu'il explore et l'a-

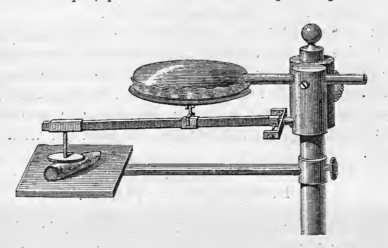


Fig. 74. — Théorie du myographe qui inscrit le gonflement du muscle.

platit transversalement contre une plaque de métal qui lui sert d'appui (1). En faisant glisser verticalement le tambour ex-

(1) *Voir* pour les détails de la myographie fondée sur l'étude du gonflement musculaire : *Du mouvement dans les fonctions de la vie*, p. 248, et *La Machine animale*, p. 36 et 238.

plorateur le long de la tige qui le supporte, on exerce des pressions plus ou moins énergiques sur le muscle exploré, ce qui est souvent très-utile pour sensibiliser l'instrument au maximum.

Des excitateurs électriques, isolés l'un de l'autre, sont adaptés aux deux surfaces métalliques entre lesquelles le muscle est saisi, et servent à provoquer toutes sortes d'excitations directes de cet organe, soit par les courants d'une pile, soit par ceux d'une bobine d'induction.

Cette disposition rappelle celle que j'employai dans mes premières expériences et qui fut décrite sous le nom de *pince myographique* (1) ; elle est toutefois beaucoup plus simple et n'exige, pour ainsi dire, aucune construction spéciale (2). Des pinces myographiques multiples, appliquées sur le trajet d'un faisceau musculaire servaient à signaler le passage de l'*onde* et à en mesurer la vitesse de propagation ; l'explorateur représenté figure 74 peut, avec avantage, s'employer dans les mêmes conditions. Les expériences relatives au mouvement de l'onde musculaire trouveront leur place ailleurs ; elles se rattachent à un genre d'étude particulier basé sur l'inscription simultanée de phénomènes multiples.

En résumé, toutes les expériences de myographie que l'on peut faire sur les animaux n'exigent plus d'autre appareil que le tambour à levier explorateur ; c'est là une importante simplification de la méthode. Toutefois, la myographie, pour s'appliquer à l'homme, exige un explorateur un peu différent, mais peut-être plus simple encore que celui qui vient d'être décrit.

D. *Myographie sur l'homme.*

Pour explorer le gonflement d'un muscle, le mieux est d'employer une capsule, pareille à celle d'un tambour à levier, à l'intérieur de laquelle on a mis un ressort boudin qui fait

(1) *Du mouvement dans les fonctions de la vie*, p. 260.

(2) Il faut noter que les tambours explorateurs ne doivent pas seulement opposer l'élasticité de leurs membranes à l'effort développé contre elle par le muscle. A l'intérieur de ces tambours on place un ressort boudin qui fait saillir les membranes et lutte contre la force motrice dont les phases seront inscrites.

un peu saillir la membrane. Sur cette dernière (fig. 75), on dispose un bouton de métal qui, relié à un fil conducteur, sert au besoin à exciter le muscle.

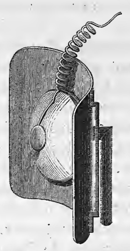


Fig. 75. — Explorateur du gonflement des muscles s'appliquant aux recherches de Myographie sur l'homme.

La capsule s'applique par sa face élastique sur le muscle qu'on veut explorer ; on la maintient fortement serrée, et immobilisée au moyen d'un bandage roulé ; enfin, un tube de caoutchouc relie cet explorateur à un tambour inscripteur. De cette façon, on détermine les caractères des mouvements volontaires que les muscles exécutent, soit dans la marche, soit dans les différentes actions des bras ou des jambes. En médecine, on constate, au moyen de cet explorateur, que les tremblements et les convulsions musculaires présentent parfois certains types bien accusés.

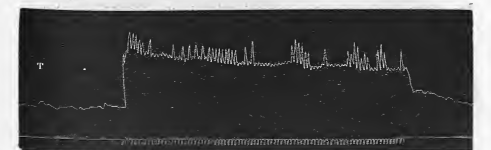


Fig. 76.—Tracé recueilli par MM. Debove et François-Franck. Tétanos électrique d'un mucsle chez un sujet atteint d'atrophie musculaire progressive avec soubresauts fibrillaires.

Outre les mouvements que les muscles exécutent sous l'influence de la volonté, on peut encore inscrire, sur l'homme, les mouvements que l'électricité provoque et les modifications que ces mouvements éprouvent, suivant l'état de veille ou de sommeil, sous l'action de certains médicaments, et dans certaines maladies.

En explorant le gonflement d'un muscle, on a une courbe si fidèle du mouvement qui se produit, que le tracé révèle par une ligne horizontale l'existence d'un obstacle absolu au raccourcissement musculaire. On constate que les phases d'un mouvement produit sous l'action d'un muscle sont absolument identiques à celles que signale la courbe du gonflement musculaire. Cette identité est tellement parfaite qu'on obtient des courbes semblables en inscrivant, sur un oiseau qui vole, soit les phases du gonflement et du dégonflement alternatif des muscles pectoraux, soit les phases de l'abaissement et de l'élévation de l'aile que l'action de ces muscles pectoraux commande (1).

INSCRIPTION DES MOUVEMENTS RESPIRATOIRES.

L'inscription du changement de volume des organes s'applique fort bien à l'étude de la respiration. Si l'on inscrit le mouvement alternatif de dilatation et de resserrement de la cage thoracique, on a l'un des renseignements les plus précieux qu'il soit possible d'obtenir relativement à la fonction respiratoire.

L'instrument fort simple qui sert à cette étude se nomme *pneumographe;* il est représenté dans la figure 77.

On voit dans l'espace limité par le cordon circulaire la place qui doit être occupée par le thorax. Une ceinture en embrasse la circonférence et porte, sur un point de sa continuité, le pneumographe dont voici la disposition. Deux branches divergentes reçoivent, par de solides attaches, les deux bouts de la ceinture inextensible qui fait le tour de la poitrine. Au moment de la dilatation thoracique, la traction exercée par les cordons sur les branches de l'appareil les rend plus divergentes encore, grâce

(1) Voy. *La Machine animale*, p. 242.

à la flexion d'une lame intermédiaire d'acier R qui fait ressort. Cette divergence des deux branches produit une traction sur la membrane d'un tambour qui est relié par un tube à air *a* avec un tambour inscripteur. Quand le thorax se dilate, la courbe tracée s'abaisse ; elle s'élève, au contraire, si le thorax se resserre, c'est-à-dire dans l'expiration. Ce sens de l'inscription des mouvements respiratoires m'a paru être le meilleur : c'est, en effet, celui dont la signification m'a semblé le plus facile à retenir. Quand on lit un tracé des mouvements respiratoires, on pense naturellement à la pression plus ou moins grande que l'air éprouve dans le poumon ; or, cette pression monte dans l'expiration et descend dans l'inspiration, c'est-à-dire dans le sens même de la courbe fournie par le pneumographe.

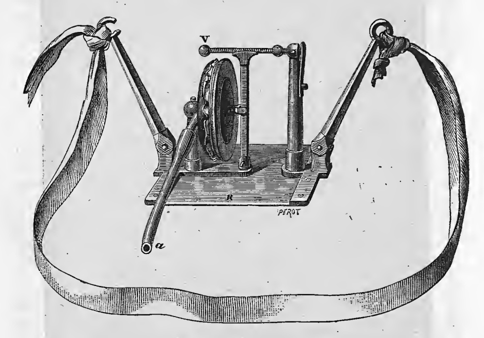


Fig. 77. — Pneumographe ou explorateur des mouvements respiratoires.

Il n'est pas nécessaire de rappeler ici avec de longs détails les différents types que les mouvements respiratoires présentent à l'état physiologique. La figure 78 montre les changements qui se produisent lorsqu'il existe un obstacle au passage de l'air pendant la respiration ; elle fait voir que le type respiratoire diffère suivant que l'obstacle au mouvement

Fig. 7. — Tracés de la respiration de l'homme à l'état normal et dans les cas de gêne respiratoire.

de l'air existe dans les deux sens ou dans un sens seulement (1).

Dans cette figure, la ligne pleine A exprime le type normal de la respiration. Quand un obstacle s'oppose au mouvement de l'air et le gêne autant à l'inspiration qu'à l'expiration, ainsi que cela arrive quand on comprime la trachée, les mouvements respiratoires se ralentissent mais prennent plus d'amplitude O (ligne ponctuée).

Quand l'obstacle n'existe qu'au mouvement de l'air dans un sens, ainsi que cela s'obtient quand on respire à travers un tube fermé au moyen d'une soupape qui l'obstrue incomplétement, on constate un allongement de la période respiratoire pendant laquelle l'air rencontre un passage difficile. Ainsi, en tournant la soupape de façon que l'inspiration soit libre, tandis que l'expiration est gênée, on voit s'allonger la période de la courbe qui correspond à la phase expiratoire : C (ligne ponctuée).

Si l'on oriente la soupape en sens inverse, c'est l'inspiration au contraire qui s'allongera : B (ligne pleine).

MOUVEMENTS DE LA LOCOMOTION.

Tous les mouvements relatifs, dont le mode d'inscription nous a occupés jusqu'ici, sont assez faciles à recueillir, en ce sens que les organes voisins fournissent un commode point d'appui pour apprécier le déplacement du point exploré par l'instrument. D'autre part, il n'est pas besoin de transmettre ces mouvements à de grandes distances, l'organe exploré pouvant toujours être placé au voisinage du style inscripteur; mais on n'a pas toujours des conditions aussi favorables. Ainsi, dans l'étude des mouvements de l'aile de l'oiseau pendant le vol, il fallait trouver sur le corps de l'animal un point d'appui pour le tambour à levier; d'autre part, il fallait, pour laisser à l'oiseau un libre espace à parcourir, transmettre les mouvements de ses muscles ou de ses ailes, par des tubes de grande longueur; ces difficultés n'ont pas compromis le succès des expériences (2).

(1) *Journal de l'anatomie et de la physiologie*, 1865, p. 428.

(2) Voir pour les détails et les résultats des expériences : *La Machine animale*, p. 236.

Dans ses études sur le *mécanisme de la marche*, le professeur Carlet avait besoin d'inscrire les oscillations verticales que le pubis exécute à chaque phase d'un pas. Il lui fallait, pour supporter le tambour explorateur, un appui qui restât toujours à la même hauteur au-dessus du sol, tout en se déplaçant horizontalement suivant la translation du corps. Ces conditions ont été réalisées au moyen d'un manége tournant dont le bras, toujours parfaitement horizontal, portait le tambour explorateur. Le levier de l'appareil, relié au pubis, s'élevait et s'abaissait tour à tour pendant la marche (1). On avait donc ainsi un point d'appui, à la fois mobile dans un plan horizontal, et fixe par rapport aux mouvements verticaux qu'il s'agissait d'inscrire.

Enfin, quand il faut inscrire les oscillations verticales d'un corps qui ne peut être relié à aucun point d'appui, il est possible encore de réussir, en certains cas, au moyen de l'artifice suivant représenté figure 79.

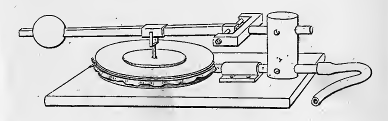


Fig. 79. — Tambour explorateur des oscillations. Cet appareil s'applique à l'étude des réactions verticales ou horizontales qui accompagnent les différentes allures de l'homme ou des animaux, à l'étude des oscillations du corps de l'oiseau pendant le vol, etc.

On charge d'une masse le levier d'un tambour explorateur; ce levier est placé horizontalement sur une planchette à laquelle on imprime des oscillations verticales. Dans ces conditions de mouvements continuellement variés imprimés à l'appareil, la masse qui charge le levier présente continuellement une résistance par son inertie; quand le tambour s'élève, la masse abaisse la membrane, tandis que dans les mouvements d'abaissement elle la relève. Il est bien entendu que ces effets ne peuvent se produire qu'à la

(1) *Voir* pour les détails de l'expérience : *Annales des Sciences naturelles*, juillet 1872.

condition que les oscillations imprimées à l'appareil soient rapides, comme celles du corps de l'oiseau dans le vol (1) ou comme celles qui constituent les *réactions* d'un cheval au trot ou au galop (2).

Inscription des vibrations sonores. — Aux mouvements rectilignes alternatifs doivent se rattacher les vibrations des cordes, des diapasons, des verges élastiques et des membranes.

Ces mouvements ont été étudiés à l'aide de la méthode graphique par un grand nombre de physiciens parmi lesquels Helmholtz, Kœnig, Lissajoux, et tant d'autres ont fait des découvertes de premier ordre. On peut affirmer que c'est à l'emploi de la méthode graphique que l'acoustique doit d'être aujourd'hui l'une des sciences les plus avancées. Il faudrait de longs développements pour exposer, même sommairement, la manière dont se combinent entre elles les vibrations de différents nombres et reproduire les figures graphiques qui caractérisent leurs accords. Pour les détails de cet intéressant sujet, nous renverrons aux traités spéciaux.

En résumé, on voit que tout mouvement rectiligne peut être inscrit d'une manière assez facile, soit que ce mouvement se produise dans une seule direction, soit qu'il ait lieu alternativement dans les deux sens.

Ni la force du mouvement, ni sa rapidité extrême ne peuvent l'empêcher d'être inscriptible. Marcel Deprès, dans une remarquable expérience, a inscrit directement sur une plaque enfumée le mouvement d'un projectile lancé par la poudre à canon. D'autre part, à titre de mouvement d'une extrême lenteur pouvant être graphiquement représenté, je citerai l'accroissement d'une plante. On a vu, d'autre part, comment se réduit ou s'amplifie le mouvement pour être le mieux possible approprié à nos moyens d'étude; plus tard, à propos de la technique expérimentale, je montrerai par quels procédés le tracé d'un mouvement quelconque peut être grandi ou diminué suivant le rapport désiré, sans que la forme en soit nullement altérée.

Enfin j'insiste sur l'importance extrême de ne pas multiplier

(1) Voy. *La Machine animale*, p. 277.
(2) *Ibid.*, p. 160 et 172.

les appareils en raison des différentes sortes de mouvements qu'ils doivent inscrire. Deux ou trois types différents d'instruments semblent devoir être toujours un minimum indispensable, mais le lecteur a dû remarquer la préoccupation que j'ai toujours eue d'appliquer les mêmes appareils aux usages les plus différents. Quelle qu'en soit la provenance, quels que soient les artifices employés pour le recueillir, un mouvement de très-grande étendue pourra, à peu près toujours, être réduit au moyen d'une vis; un mouvement de moyenne étendue transmis à l'aide d'un fil sans modification de son étendue; enfin un mouvement très-faible sera amplifié par un levier.

VII. — Inscription des mouvements composés qui s'exécutent dans un même plan.

Expériences des acousticiens ; tracés de Kœnig.—Applications à la détermination des mouvements de l'aile de l'insecte.—Trajectoire de l'aile de l'oiseau ; — Oscillations de l'oiseau dans le plan vertical. — Trajectoire de l'oiseau dans les airs. — Applications diverses.

On a vu dans le chapitre Ier (1) comment, suivant la méthode des acousticiens, on trace sur le papier la trajectoire décrite par une verge de Wheatstone qui vibre suivant deux directions perpendiculaires l'une à l'autre. La figure 80 montre une de ces trajectoires ; elle n'exprime que le parcours de la pointe écrivante, abstraction faite du temps employé par cette pointe à suivre telle ou telle partie de la courbe tracée.


Fig. 80. — Trajectoire d'une verge de Weatstone, vibrant dans le rapport de 2 à 3 ; tracé recueilli sur un papier immobile.

Mais, quand on a obtenu une semblable figure écrite sur papier immobile, si l'on recueille le tracé du même mouvement sur un papier qui marche avec une vitesse connue, on obtient une figure nouvelle dont la comparaison avec celle qui s'est inscrite sans translation du papier permet d'apprécier les phases du mouvement vibratoire.

La figure 81 n'est autre que celle qui est représentée figure 80, avec cette différence que, dans le second cas, le papier qui reçoit la courbe marche avec une vitesse de 30 centimètres par seconde.

C'est par ce même procédé que j'ai essayé d'inscrire les vibrations de l'aile de différents insectes et que j'ai recueilli des figures partielles du parcours de ces organes. On voit un spécimen de ces tracés dans la figure 82.

(1) T. Ier, 1875, p. 134.

Ce qui empêche d'obtenir ainsi la forme complète de cette trajectoire, c'est que l'aile d'un insecte, tournant autour de son point d'attache, décrit à son extrémité une figure sphérique qui ne peut être tangente que par un point à la surface d'un plan

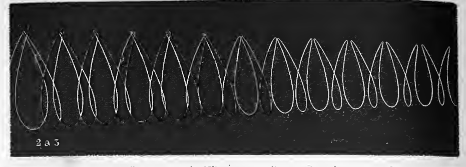


Fig. 81. — Trajectoire d'une verge de Wheatstone vibrant dans le rapport de 2 à 3; tracé recueilli sur un papier animé d'une translation rapide.

et surtout à la surface d'un cylindre comme ceux qui servent à recueillir les tracés. Ce n'est qu'en appuyant un peu fortement la pointe de l'aile contre le cylindre qu'on obtient des figures moins incomplètes, mais la flexion de l'aile qui se produit alors entraîne une déformation des tracés.

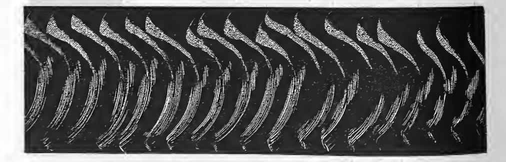


Fig. 82. — Tracés partiels de la trajectoire d'une aile d'insecte pendant le vol.

Les mouvements de l'aile de l'oiseau peuvent s'écrire d'une manière beaucoup plus sûre, grâce aux appareils à transmission du mouvement. On a vu comment fonctionne le pantographe à transmission déjà décrit dans le chapitre Ier (1). Que l'on suppose l'un de ces appareils placé sur une table, en face d'une surface de verre enfumé sur laquelle sa pointe va tracer, tandis que l'autre appareil, placé sur le dos d'un oiseau de forte

(1) T. I, p. 134, fig. 69.

taille, est actionné par le double mouvement de haut en bas et d'avant en arrière que les ailes exécutent dans le vol. Les mouvements du premier appareil, transmis au second par des tubes de longueurs suffisantes, iront s'inscrire sous les yeux de l'observateur (1).

La disposition de l'appareil explorateur peut être modifiée plus ou moins, suivant les besoins particuliers, mais, dans tous les cas de ce genre, elle se compose essentiellement de deux tambours disposés perpendiculairement l'un à l'autre et dont l'un reçoit les mouvements verticaux, l'autre, les mouvements qui se font d'avant en arrière.

Dans certains cas, il est plus facile de recueillir séparément les mouvements de sens vertical et ceux de sens horizontal; puis, quand on a obtenu la courbe de chacun d'eux, on s'en sert pour recomposer la courbe fermée de la trajectoire de l'aile, suivant les procédés de la géométrie. C'est par cette méthode que j'ai obtenu la trajectoire de l'aile de la buse et celle du pigeon.

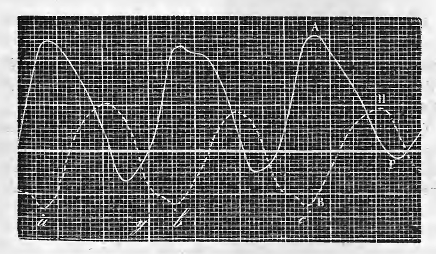


Fig. 83. Courbes des deux ordres de mouvement de l'aile d'un pigeon. — AP, ligne pleine, mouvements dans le sens antéro-postérieur. — HB, ligne ponctuée, mouvements de haut en bas.

La figure 83 montre, dans la courbe formée d'une ligne pleine A P, les mouvements d'avant en arrière de l'aile du pigeon; la courbe ponctuée H B correspond au mouvement dans le sens vertical.

(1) *La Machine animale*, p. 244.

Ces deux courbes combinées engendrent, pour chaque révolution de l'aile de l'oiseau, une courbe fermée dont la figure 84 fournit un type.

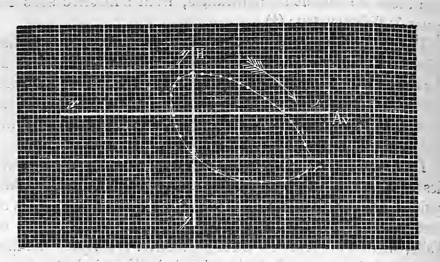


Fig. 84.— Courbe fermée de la trajectoire de l'aile du pigeon obtenue par la recomposition géométrique des deux courbes de la figure 83.

La courbe de la trajectoire de l'aile d'un oiseau représente toujours une sorte d'ellipse dont les axes sont fort inégaux. Le grand axe est incliné en bas et en avant par rapport à la direction du vol. Enfin, la flèche qui accompagne la courbe indique le sens dans lequel s'effectue le mouvement.

On peut encore obtenir une courbe composée qui exprime les deux ordres d'oscillations qu'un oiseau, en volant, exécute dans le plan vertical. On a vu figure 79 la disposition de l'appareil explorateur des oscillations verticales. Placé sur le dos d'un oiseau, sur la croupe ou sur le garrot d'un cheval, sur la tête d'un coureur, cet appareil transmet au levier écrivant ce qu'on appelle les *réactions verticales*. Si, au lieu d'être placée horizontalement, la membrane de ce tambour explorateur était placée dans un plan vertical, en présentant sa face antérieure dans la direction du vol, l'appareil deviendrait un explorateur des réactions horizontales, c'est-à-dire des accélérations et des ralentissements qui accompagnent les différents instants du vol. En combinant deux explorateurs des oscillations de l'oiseau, de façon à recueillir et à inscrire en même temps les oscillations verticales et les oscillations horizontales, on ob-

tient une courbe représentée figure 85 et qui retrace toutes les réactions du vol.

Je n'entreprendrai pas ici l'analyse de cette courbe (1), et me bornerai à la signaler comme l'une des plus instructives qu'on puisse recueillir dans l'analyse graphique du vol des oiseaux.

Enfin, j'ai proposé un procédé qui permettrait d'inscrire la trajectoire que parcourt dans l'espace un oiseau qui plane ou un ballon emporté par le vent (2).

Les applications de la méthode graphique à la détermination des mouvements composés sont encore rares en physiologie, mais la physique en devra tirer un grand

Fig. 85. — Inscriptions combinées des réactions du corps de l'oiseau pendant le vol (expériences faites sur la Buse). A gauche de la figure, réactions des premiers instants du vol ; à droite, réaction dans le plein vol. (Pour l'interprétation de cette courbe, voir l'analyse détaillée qui en a été faite dans *la Machine animale*.)

(1) *Voir* pour les détails de cette analyse *la Machine animale*, p. 280.

(2) Ce procédé consiste dans l'emploi de 2 chambres noires orientées perpendiculairement l'une à l'autre et situées toutes deux dans un même plan horizontal, à une distance connue l'une de l'autre. Deux observateurs suivraient chacun la trajectoire de l'oiseau, à l'aide d'un style qui pointerait à des intervalles de temps réguliers. Les deux styles seraient reliés électriquement l'un à l'autre et pointeraient les temps tous deux ensemble, par la clôture d'un même courant de pile. De ces deux images, dont chacune correspond à la projection de la trajectoire de l'oiseau sur un plan vertical et qui sont recueillies chacune sur un plan perpendiculaire à celui de l'autre, se déduirait géométriquement la trajectoire de l'oiseau dans l'espace.

secours. Depuis les belles expériences de Kœnig qui inscrivit les vibrations composées d'une verge de Wheatstone sur un cylindre tournant, il s'est ouvert aux physiciens des horizons nouveaux qui ne resteront pas longtemps inexplorés. Quant à la physiologie, elle doit, avant d'aborder les phénomènes complexes, appliquer les procédés d'inscription à des phénomènes plus simples, mais qui pourtant ont échappé jusqu'ici aux moyens d'observation.

Nous bornerons ici l'exposé des moyens d'inscrire les mouvements des solides. Dans les applications de la méthode graphique dont l'énumération a été faite jusqu'ici, nous ne nous sommes pas trouvés aux prises avec les grandes difficultés ; les organes dont il fallait connaître le mouvement permettaient de le recueillir avec assez de facilité. Dans les chapitres prochains nous considérerons le mouvement de corps qui ne peuvent livrer aux appareils aucun point d'attache : je veux parler des liquides et des gaz dont les mouvements si variés sont la préoccupation incessante des physiologistes. Cette étude commencera par le cas le plus simple : l'écoulement des liquides à l'air libre.

VIII. — Inscription du mouvement des liquides. — Écoulement à l'air libre.

Mesures anciennes : éprouvettes graduées. — Inscription des changements de niveau qui se produisent dans le vase où le liquide s'écoule. — Eprouvette flottante constituant un aréomètre inscripteur. — Courbes des variations du travail du cœur. — Courbes de la miction. — Inscription des écoulements très-faibles et très-prolongés. — Courbes des volumes et courbes des vitesses; construction et avantages de chacune de ces courbes.

MESURE D'UN ÉCOULEMENT A L'AIR LIBRE.

La mesure d'un débit, c'est-à-dire de la quantité de liquide versé en un temps donné, se fait, en général, au moyen de vases ou d'éprouvettes gradués dans lesquels on reçoit le liquide qui s'écoule pendant un temps exactement connu. Deux ou plusieurs épreuves successives montrent si l'écoulement est uniforme, c'est-à-dire si, en des temps égaux, les quantités versées ont été égales, ou si au contraire l'intensité du débit a varié.

Non-seulement cette méthode est lente, mais encore elle est peu précise, car il est difficile de mesurer exactement le temps pendant lequel l'éprouvette a reçu le liquide ; ce n'est qu'en faisant cette durée très-longue qu'on rend négligeables les erreurs commises dans l'évaluation du temps. Mais alors on ne peut avoir qu'une confiance très-bornée dans la signification des volumes mesurés, relativement à la régularité de l'écoulement. On peut concevoir que, pendant deux épreuves, toutes deux de même durée, une même quantité de liquide ait été versée, ce qui ferait croire que l'écoulement a été régulier, et que pourtant la vitesse avec laquelle ce liquide s'est écoulé ait été très-différente aux divers instants de ces deux expériences.

La méthode graphique permet d'éviter ces causes d'erreur,

en même temps qu'elle simplifie les procédés de mensuration d'un débit de liquide. Nous allons indiquer ces différents procédés.

A. *Inscription des changements de niveau qui se produisent dans le vase où le liquide s'écoule.* — Pour inscrire un débit de liquide, il suffit parfois de placer un flotteur sur l'éprouvette qui va se remplir et d'inscrire les phases graduelles de l'ascension de ce flotteur. Afin d'éviter les effets de l'agitation des liquides sous l'influence de l'écoulement et les trépidations qui s'ensuivraient du côté de la ligne tracée, il est avantageux d'employer deux vases communiquants dont l'un reçoit le liquide, tandis que l'autre contient le flotteur. Cette disposition est représentée figure 86.

Si la somme des sections transversales des deux vases correspond à un nombre simple de centimètres carrés, 20 centimètres carrés par exemple, une ascension de 1 centimètre éprouvée par le flotteur exprimera un débit de 20 centimètres cubes d'écoulement et ainsi de suite. Le déplacement du flotteur se transmet, à l'aide d'un fil, au chariot inscripteur de l'appareil déjà représenté (1). Quand le mouvement du flotteur est très-faible, comme cela arrive quand on se sert d'un flotteur à petite section, il faut un appareil inscripteur extrêmement sensible : nous allons décrire et représenter (fig. 86) celui qui nous a fourni les meilleurs résultats.

L'emploi de deux vases communiquants présente un désavantage dans le cas où le débit du liquide qu'il s'agit de mesurer est peu considérable. En effet, la portion du liquide qui est dans le vase muni du flotteur est seule active pour produire l'inscription de l'écoulement. Plus la surface de ce vase sera grande, mieux seront assurés, contre les résistances passives, les mouvements du flotteur et par suite ceux du style écrivant. Il est donc assez utile de faire le vase à flotteur assez large : de ne pas lui donner moins de 4 à 5 centimètres de diamètre.

Au contraire, l'emploi des deux vases communiquants est très-précieux quand on doit mesurer un débit considérable ; cette disposition constitue un excellent moyen de réduire, dans

(1) Voyez Ier volume, p. 264, figure 124.

un rapport connu, les indications de l'appareil inscripteur relativement au volume du liquide écoulé.

Supposons que le vase qui porte le flotteur fasse parcourir au style écrivant 20 centimètres de chemin pour un litre de liquide versé dans ce vase, si l'on met le vase à flotteur en

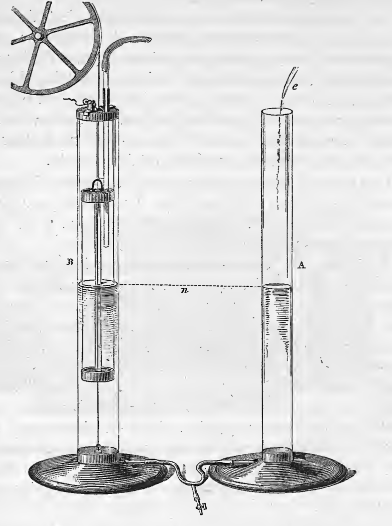


Fig. 86. — Flotteur inscrivant la courbe d'un écoulement de liquide. A et B vases communiquants ; *e* orifice d'écoulement ; *n* niveau graduellement croissant de l'eau dans les deux vases. Du flotteur qui remplit presque entièrement le diamètre du vase B, se détache un fil qui passe sur une large poulie d'aluminium, et va actionner le style inscripteur représenté figure 87.

communication avec un autre de même forme et de même capacité, il faudra un écoulement de deux litres pour produire la même course; en donnant au deuxième vase une section

transversale 99 fois plus grande que celle du premier, il faudra un débit de 100 litres pour produire le même parcours du style écrivant. Ainsi, ce procédé permet en réalité de sensibiliser ou de désensibiliser l'appareil inscripteur de l'écoulement d'un liquide et de régler les indications de cet appareil à une échelle convenable (1).

Un point important dans ces expériences, c'est d'assurer la liberté des mouvements du flotteur et d'empêcher celui-ci d'aller se coller aux parois de l'éprouvette sous l'influence de la capillarité, ce qui créerait des résistances notables à la transmission du mouvement. On obvie à ce danger en employant un flotteur percé d'un tube longitudinal que traverse un fil de métal fortement tendu. Ce fil sert de guide au flotteur qu'il maintient constamment au centre de l'éprouvette.

Une autre disposition pour inscrire les phases d'un écoulement de liquide est celle que Mosso a employée pour mesurer le déversement lié au changement de volume d'un organe immergé dans un liquide (2).

C'est dans une éprouvette flottante que le liquide est recueilli. A mesure qu'elle s'emplit, l'éprouvette plonge davantage, à la façon d'un aréomètre à volume variable; elle transmet son mouvement à un appareil inscripteur qui, en traçant la courbe du plongement de l'éprouvette, trace, par conséquent, la courbe de l'écoulement qui s'est produit. Tout en conservant l'emploi de l'éprouvette plongeante, j'ai substitué au mode d'inscription employé par Mosso, l'emploi du chariot horizontal qui trace sur le cylindre. Dans les expériences de ce genre, j'ai dû atténuer autant que possible les résistances dues aux frottements, afin que les mouvements du style obéissent bien fidèlement aux changements de niveau du liquide qui les commandent.

Voici la disposition qui, jusqu'ici, me satisfait le mieux.

(1) C'est sur ce principe que sont établis les flotteurs destinés à inscrire les niveaux des fleuves et les hauteurs des marées. Le flotteur de ces instruments est placé dans un puits qui communique, par un tuyau latéral, soit avec le fleuve, soit avec la mer, de sorte que les effets du courant ou ceux de l'agitation des vagues n'arrivent pas jusqu'à lui.

(2) Mosso, *Von Einigen neuen Eigenschaften der Gefässwand.* — *Arbeiten aus Physiol. Lab. zu Leipzig*, 1875, p. 158.

Et d'abord, pour ne pas multiplier les appareils, celui qui tout à l'heure servait de flotteur inscrivant (fig. 86) va devenir, au besoin, éprouvette inscrivante. Ce flotteur, en effet, est ouvert par en haut et présente une capacité cylindrique dans laquelle, au moyen d'un tube spécial, on fait arriver le liquide à mesurer. Le fil tendu qui traverse le tube intérieur de l'éprouvette la guide avec le moins de frottements possible.

Enfin, pour faciliter autant que possible les mouvements du style écrivant, je remplace le chariot déjà connu par un flotteur spécial qui glisse sur deux petits canaux, conduit par deux fils réfléchis sur des poulies semblables à celle de la machine d'Atwood. La figure 87 donne une idée de cette disposition qui peut s'appliquer à un très-grand nombre d'expériences ainsi qu'on le verra plus tard.

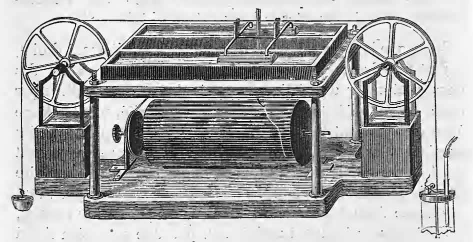


Fig. 87. — Style écrivant conduit sur deux canaux afin de réduire les frottements au minimum.

On y voit, écrivant sur le cylindre, le style qui trace les mouvements du flotteur sous l'influence d'un écoulement de liquide. A droite de la figure, on aperçoit le sommet du vase de verre B (fig. 86) qui contient le flotteur; le fil qui s'attache en haut de celui-ci, se réfléchit sur une première poulie d'aluminium, puis sur une seconde, après quoi il redescend et soutient un contre-poids.

Chaque fois que le flotteur s'élève d'une certaine quantité, le contre-poids descend d'autant, et le fil, dans sa partie horizontale, se déplace, de droite à gauche, de la même

quantité, en faisant tourner les deux poulies qui sont extrêmement mobiles. Or, c'est dans ce mouvement que le fil entraîne le style inscripteur. Celui-ci fait partie d'un système flottant formé de deux tubes légers, fermés à leurs deux bouts et réunis l'un à l'autre par des traverses; ces deux tubes sont placés exactement dans l'axe de deux canaux remplis d'eau sur lesquels ils flottent avec une facilité extrême. Entre les deux canaux est une longue fente par laquelle descend une tige verticale qui se détache des flotteurs conjugués pour aller porter la plume écrivante au contact du cylindre.

Dans la figure 87, on aperçoit seulement l'extrémité de la plume au moment où elle trace la courbe sur le cylindre. Avec cette disposition, les frottements sont très-réduits, car les poulies d'aluminium tournent avec une extrême facilité et le glissement sur l'eau est aussi très-facile.

Pour que le style soit conduit en ligne parfaitement droite, il faut prendre certaines précautions: quand les parois des canaux et celles des flotteurs sont toutes deux mouillées par l'eau, il se manifeste, en vertu de la capillarité, une tendance à un déplacement latéral qui fait coller les flotteurs contre les parois des canaux. On supprime cette tendance en passant les flotteurs sur la flamme d'une bougie, afin de les enduire de noir de fumée; dès lors, ils ne sont plus mouillés par l'eau, et comme l'eau mouille, au contraire, les parois des canaux, les flotteurs se trouvent maintenus, par une répulsion liée à la capillarité même, dans l'axe des canaux sur lesquels ils glissent. Grâce à cette précaution, le style obéit, sans saccades, au changement de niveau de l'eau dans le vase où se trouve le flotteur et fournit des courbes tout à fait satisfaisantes.

Quel que soit le procédé qu'on préfère, qu'on se serve du flotteur ou de l'éprouvette plongeante, cette méthode suppose l'emploi d'un cylindre qui tourne avec plus ou moins de vitesse suivant la durée de l'expérience. La disposition la plus simple consiste à placer sur l'axe du cylindre une poulie de grand diamètre qu'une courroie sans fin relie à un moteur d'une vitesse convenable. Suivant la durée de l'expérience,

on prend, pour actionner la poulie, un moteur qui fasse un tour en un jour, en une heure, en une minute, etc. (1).

I. *Courbes du travail du cœur.*

Le mode d'inscription qui vient d'être décrit est susceptible de nombreuses applications en physiologie. Je l'ai employé avec succès pour étudier les variations du travail du cœur qui se produisent sous l'influence des changements de la température ambiante, des pressions que le sang doit vaincre, ou de l'action de certaines substances sur le cœur.

Le problème était celui-ci : il est bien démontré que la chaleur accélère les mouvements du cœur et que le froid les ralentit ; on peut se convaincre de la réalité de ce fait en faisant circuler, à travers un cœur isolé, du sang dont on élève ou dont on abaisse la température. Mais les systoles accélérées envoient chacune moins de sang que les systoles ralenties par le froid. Le changement de fréquence des impulsions cardiaques est-il plus ou moins compensé, au point de vue du débit total, par le changement de volume des ondées que le cœur envoie, c'est ce qu'il fallait déterminer.

D'anciennes expériences, dans lesquelles j'avais mesuré le débit cardiaque, d'après le temps nécessaire pour remplir une éprouvette d'une capacité de 1/10 de litre, m'avaient montré que, sous l'influence d'un certain degré d'échauffement, le cœur augmente son débit, c'est-à-dire son travail, tandis qu'un échauffement plus fort fait diminuer le débit. Mais cette méthode grossière ne permet pas de saisir l'instant et le degré de température où le travail cesse d'augmenter et commence à diminuer. Le mode d'inscription au moyen de l'éprouvette flottante donne la courbe de ce phénomène et fournit tous les renseignements voulus.

L'exposé de ces expériences et des résultats qu'elles fournissent fera l'objet d'un travail spécial ; disons seulement, en en relatant quelques-unes, qu'elles démontrent clairement que, par l'élévation de la température, le cœur précipite ses

(1) J'ai d'abord essayé de faire construire un rouage capable de fournir un très-grand nombre de vitesses différentes, mais au lieu de cet appareil unique, il m'a semblé bien plus commode d'employer des moteurs différents selon le besoin.

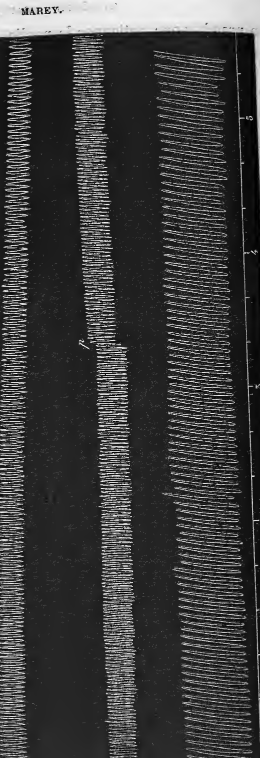


Fig. 88. — Rhythmes divers des systoles de cœurs de tortues avec l'amplitude de chacune d'elles.

Fig. 89. — Courbes du débit des cœurs de tortues dans les expériences qui ont fourni des tracés figure 88. (Les numéros d'ordre se correspondent dans les deux figures.)

battements et produit une plus grande somme de travail, jusqu'à un certain degré à partir duquel, tout en accélérant de plus en plus son rhythme, le cœur fait de moins en moins de travail, c'est-à-dire envoie dans les artères des ondées de plus en plus petites. Cette conclusion ressort de l'examen des figures 88 et 89.

La figure 88 correspond à cinq séries d'expériences faites avec des cœurs de tortues que traversait une circulation artificielle de sang de bœuf. La température ambiante était d'environ 32° centigrades. Le cœur était placé dans un flacon plein d'air et mis en communication avec un tambour à levier. De cette façon, les changements de volume du cœur s'inscrivaient, ce qui correspondait à l'inscription du volume de chaque ondée ventriculaire. La figure 89 représente, sous les mêmes numéros d'ordre que dans la figure 88, la courbe du travail ou débit du cœur. Chaque expérience dure 5 minutes 1/2.

Expérience I. — Cœur récemment détaché de l'animal; la courbe inférieure (fig. 88) montre que les systoles sont relativement peu fréquentes, mais très-étendues; elles présentent peu d'irrégularités. Dans la figure 89, le travail est représenté par la courbe n° I, c'est la plus rapidement ascendante de toutes celles que renferme ce tableau; elle correspond à un débit de 180 centimètres cubes en 2 minutes 40 secondes; enfin, c'est une ligne droite, ce qui exprime l'uniformité du travail du cœur.

Expérience II. — Courbes des systoles plus fréquentes et moins amples. En *p*, on a élevé le niveau du réservoir du sang qui fournit à la circulation artificielle; il s'en est suivi une élévation du niveau des courbes systoliques. Du côté des courbes du travail, celle qui porte le n° II présente, en *p*, une inflexion légère qui exprime une légère augmentation du travail sous l'influence d'une charge sanguine un peu plus forte.

Expérience III. — Analogue à la précédente : on laisse le niveau baisser dans le vase de sang qui fournit à la circulation; il en résulte un abaissement graduel des courbes systoliques. Du côté du débit, la courbe III annonce une décroissance graduelle.

Expérience IV. — Il s'agit d'un cœur dont le sérum a été empoisonné par l'émétique (0,10 centigrammes pour un litre de sérum). On voit une modification singulière du rhythme, et sur la courbe n° IV du travail, une diminution graduelle.

Expérience V. — Cœur de tortue chauffé, derniers instants de l'expérience; les systoles deviennent de moins en moins volumineuses. La courbe du travail annonce un débit très-faible et décroissant.

II. *Courbes de la miction.*

Une importante application de l'inscription d'un débit peut être faite en médecine; elle est relative au diagnostic de certaines affections des voies urinaires. L'observation directe montre que, dans certains cas d'atonie des parois vésicales, vers la fin de la miction, l'urine est expulsée avec une grande faiblesse. La mesure graphique du débit de la miction fournira des renseignements bien plus précieux que l'observation seule. Il n'est pas douteux que cette méthode n'apporte de nouveaux éléments de diagnostic, en montrant, par une courbe fidèle, si la lenteur de l'émission se produit au début ou à la fin de la miction, ou si elle porte sur toute sa durée. La figure 90 montre plusieurs exemples de ce genre de courbes recueillis sur des sujets différents.

III. *Courbe d'un écoulement continu obtenu d'après des mensurations discontinues.*

Si l'écoulement du liquide est très-peu abondant et ne se fait que goutte à goutte, comme cela arrive pour la plupart des *sécrétions*, les variations de cet écoulement seraient trop faibles pour produire une action sensible sur le flotteur ou sur l'éprouvette; le mode d'inscription devra donc être différent. C'est au moyen du compte-gouttes à signal que cette inscription devra se produire.

On a vu (1) que chaque goutte qui se détache d'un ajutage d'écoulement tombe sur une palette et y produit un choc capable de provoquer un signal transmis par l'air à un appa-

(1) Ier vol., p. 159.



Fig. 90. Types divers de courbes de la miction. — Valeur des débits successifs, comptés sur l'ordonnée OO par centimètres cubes. — Temps par 1/2 minute de l'abscisse.

reil inscripteur. Dans la disposition que nous avons indiquée et figurée, on comparait deux écoulements simultanés, d'après le rapprochement des signaux que chacun produisait selon la fréquence des gouttes tombées. Ce mode d'estimation des débits, quoique bien supérieur à ce que ferait constater l'observation comparative des deux écoulements, n'est pas encore suffisamment précis. Il est assez difficile, en effet, de comparer la fréquence des gouttes tombées en un temps donné; cela nécessite une numération lente et fastidieuse. Aussi, est-il préférable de transformer le compte-gouttes à signal en un appareil qui trace la courbe de la fréquence des gouttes tombées.

Nous avons indiqué déjà des solutions analogues, il suffit de se reporter aux procédés d'inscription des espaces parcourus à chaque instant d'après le comptage des tours de roues (1), et l'on trouvera une disposition d'appareil qui se prête également bien à tracer la courbe de fréquence d'une série de signaux provoqués par un phénomène quelconque, la chute de gouttes liquides par exemple. Le jeu de l'échappement suppose la dépense d'une certaine force motrice, c'est à l'électricité qu'on recourra pour le produire; chaque goutte qui tombe n'aura donc qu'à provoquer la rupture d'un circuit de pile chargé d'actionner, à l'aide d'un électro-aimant, l'échappement du rouage.

Quant à la chute de la goutte, on pourra toujours lui donner la force nécessaire pour rompre le courant, en la faisant tomber de plus ou moins haut, c'est-à-dire, sans changer la position de l'ajutage d'écoulement, en abaissant plus ou moins le niveau où se trouve la palette sur laquelle chaque goutte vient tomber.

Enfin, dans certains cas où l'écoulement est un peu plus abondant, mais où il doit être inscrit pendant un temps très-prolongé, il est avantageux de se servir d'un appareil que les météorologistes ont employé à la mesure des quantités de pluie tombées. Je veux parler d'un double auget à bascule dont chaque moitié se présente tour à tour devant l'orifice d'écoulement, et se déverse quand elle est remplie. Chaque oscillation dudit appareil exprime l'écoulement d'une certaine quantité

(1) *Voyez* p. 136.

de liquide, celle qui est nécessaire à provoquer le mouvement de bascule et que l'expérience a déterminée préalablement. Or, chaque oscillation provoque, en rompant un circuit électrique, l'échappement d'une dent du rouage écrivant. Il va de soi que, suivant l'importance du débit qu'on veut étudier, on doit employer des godets basculants de capacités plus ou moins grandes.

Les divers appareils dont on vient de voir la description fournissent le moyen d'inscrire les débits de liquide, quelle que soit leur ténuité ou leur abondance, c'est-à-dire dans tous les cas qui peuvent se présenter.

B. *Courbes des vitesses d'écoulement.*— Il faut s'arrêter un instant sur un mode d'inscription de certains phénomènes qui semble très-différent au premier abord, et qui pourtant est en réalité du même ordre, je veux parler de la *courbe des vitesses*.

La courbe des *espaces parcourus* s'inscrit avec un appareil à échappements intermittents; celle des quantités de liquide versées s'inscrit avec le même appareil. Un transport plus rapide d'un véhicule, un écoulement plus rapide d'un liquide sécrété, s'accompagneront tous deux du même effet: l'accélération de la marche du style inscripteur, et s'exprimeront tous deux, dans le tracé, par l'ascension plus rapide de la courbe du phénomène. Ceci posé, voyons quel parti on peut tirer de ces sortes de courbes; ce que nous dirons de l'une d'elles s'appliquera également bien à l'autre.

Les courbes des volumes versés à chaque instant fournissent des renseignements complets sur la manière dont l'écoulement s'est produit :

1° Elles donnent la mesure de la quantité versée à tout instant, depuis le commencement de l'expérience, d'après la hauteur que la courbe a atteinte à telle ou telle division du temps. Du moment où l'on connaît la quantité de liquide qui correspond à chaque degré de l'axe des ordonnées : goutte, centimètre cube ou litre, il suffit de compter les degrés parcourus dans le sens vertical pour avoir la mesure du liquide versé.

2° Elles fournissent, par une construction géométrique très-

simple, l'indication de la vitesse moyenne de l'écoulement qui a eu lieu. En effet, si on joint par une droite l'origine et la fin de la courbe tracée, l'intersection de cette ligne avec celle qui correspond à l'unité de temps exprimera la vitesse cherchée, car elle fournira le rapport du volume écoulé à l'unité du temps. On voit, au premier coup d'œil, que plus cette droite qui joint l'origine à la fin de la courbe s'approchera de la verticalité, plus elle exprimera un écoulement rapide.

3° Enfin, la courbe des volumes écoulés fera connaître, à chaque instant, la vitesse d'écoulement, d'après l'inclinaison qu'elle présente au point observé. Pour chaque point, en effet, comme pour la courbe des vitesses moyennes, la vitesse exprimée sera d'autant plus grande que la ligne tracée s'approchera davantage de la verticalité. On comparera avec précision la vitesse de l'écoulement en deux points quelconques de la courbe, en menant des tangentes à cette courbe en ces deux points et en mesurant l'angle que ces tangentes font avec l'axe des abscisses.

C'est d'après ce principe que les géomètres construisent la *courbe des vitesses* d'un mouvement, d'après la courbe des espaces parcourus. On construira de la même façon la courbe des vitesses d'un écoulement d'après celle des volumes versés. Soit la courbe A, figure 91, exprimant tous les volumes de liquide écoulés dans une expérience; la courbe B, située au bas de la même page, exprimera les phases de la vitesse de cet écoulement. Pour la construire à la façon des géomètres, à chaque division de temps qu'on a choisie d'avance, c'est-à-dire à l'intersection de cette courbe avec les lignes verticales 0, 1, 2, 3, etc., on mène la tangente à la courbe et l'on mesure l'angle que cette ligne forme avec l'horizon, d'après la tangente trigonométrique de cet angle. Cette valeur est portée comme ordonnée au point correspondant de la courbe des vitesses.

Dans la construction de la figure B, on a procédé d'une manière plus simple : considérant comme une droite chaque élément de la courbe des débits, on se dispense de mener la tangente à la courbe, et pour estimer l'angle que chaque élément de celle-ci forme avec l'horizon, on prend le côté vertical du petit triangle 1, 2, 3, etc., dont l'hypothénuse est formée

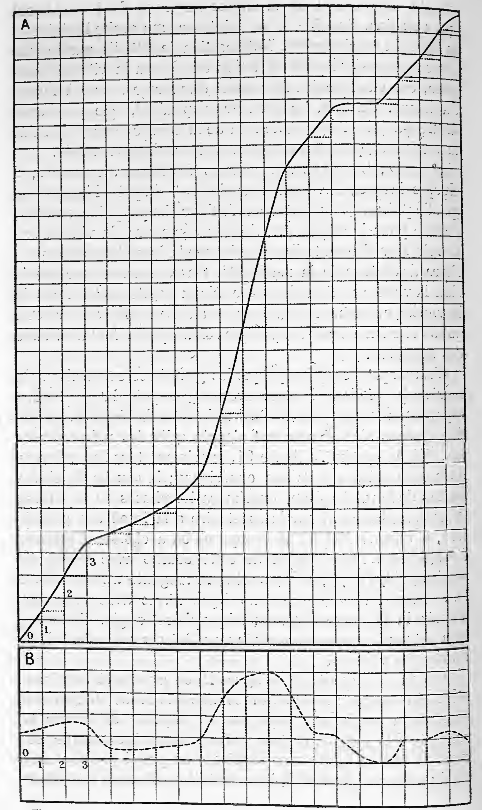


Fig. 91. — A, courbe totalisatrice des quantités de liquide versées à chaque instant. — B, courbe des vitesses du même écoulement.

par un élément de la courbe. Ce côté vertical du 1[er] triangle on le porte au point 1 de la courbe des vitesses; celui du 2[e] triangle se porte au point 2.

En opérant de la même façon pour les points suivants, on obtient la courbe B, qui diffère totalement d'aspect avec la figure A, mais qui contient les mêmes éléments sous une autre forme. On trouve, en effet, dans cette courbe :

1° La vitesse à chaque instant d'après la hauteur de *l'ordonnée* correspondante (1) ;

2° La vitesse comparative à 2 instants, d'après la hauteur comparée des 2 ordonnées correspondantes.

3° La quantité de liquide versée se déduira de la surface comprise entre la courbe des vitesses et l'abscisse, surface mesurée au moyen du planimètre de Amsler (2).

4° Enfin, la vitessse moyenne s'obtiendrait arithmétiquement en divisant l'aire de la courbe par la longueur de l'abscisse, c'est-à-dire par le temps total de l'écoulement observé.

Ainsi, la courbe des vitesses et la courbe des volumes fournissent les mêmes renseignements sous deux formes différentes. Or, ces deux expressions du même phénomène ne sont pas également favorables dans tous les cas. La courbe des volumes versés, comme toutes les autres courbes *totalisatrices*, s'engendre par la progression indéfinie du style écrivant suivant une ligne perpendiculaire au sens de la translation du papier.

Il suit de là qu'une expérience de longue durée suppose l'emploi d'un papier à très-grande surface, nécessite en outre la construction d'un cylindre de dimensions énormes en longueur et en diamètre, tandis que la courbe des vitesses, ayant toujours peu de hauteur, pourrait s'écrire sur un cylindre gros

(1) La valeur absolue de cette vitesse dépend de l'échelle à laquelle la courbe a été construite.

(2) A défaut du planimètre pour mesurer la surface comprise entre l'axe des abcisses et la courbe des vitesses, on peut recourir à une méthode dont l'origine remonte à Galilée suivant les uns, à Archimède suivant les autres. On recueille la courbe sur un papier bien homogène comme épaisseur et aussi lourd que possible; au besoin, on double ce papier d'une feuille de plomb pour le rendre plus pesant. Puis, on découpe la courbe de façon à détacher exclusivement la portion de papier dont on veut connaître la surface. Cette portion, on la pèse avec précision et on divise le poids obtenu par celui d'un morceau du même papier ayant en surface 1 centimètre carré. Il est clair que le quotient obtenu exprime le nombre de centimètres carrés contenus dans l'aire de la courbe.

et court, et mieux encore sur une de ces bandes sans fin que l'on emploie dans le télégraphe Morse.

Plusieurs tentatives ont été faites pour fournir mécaniquement l'inscription des courbes de vitesse (1). Le principe le plus simple consiste à se servir des appareils à chariot que nous connaissons déjà, et à faire en sorte que le chariot soit ramené à zéro après chaque unité de temps.

Supposons qu'il s'agisse d'inscrire la courbe des fréquences (vitesse) des pulsations du cœur. Dans la disposition primitive de l'appareil à échappement, il faudrait que le chariot traceur effectuât un parcours considérable pour donner la courbe totalisatrice des battements en une heure ou en un jour. Supposons au contraire que, de minute en minute, le chariot rétrograde, sa marche se traduira comme dans la figure 92 par une ascension oblique, sa rétrogradation au zéro par une chute verticale.

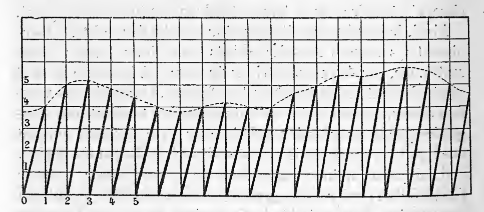


Fig. 92. — Courbe des fréquences d'actes successifs, inscrite expérimentalement.

Si on réunit entre eux les sommets des angles supérieurs, on obtiendra la courbe des vitesses des battements du cœur. En effet, chaque point de cette courbe sera d'autant plus élevé que, dans la minute correspondante, le cœur aura effectué un plus grand nombre de battements.

(1) Parmi les appareils inscripteurs de la vitesse d'un phénomène, il en est deux qui, à ma connaissance du moins, fonctionnent d'une manière satisfaisante. L'un, imaginé par M. Marcel Deprès, sert à inscrire la vitesse des trains de chemins de fer; il est encore inédit. L'autre est de M. Antoine Bréguet; c'est un anénomètre inscripteur actionné par un moulinet de Robinson et dont le style est ramené à zéro, toutes les minutes. Cet instrument est installé au jardin d'acclimatation du Bois de Boulogne.

L'avantage que présente cette disposition n'échappera à personne ; en effet, pour obtenir ces tracés des vitesses, il n'y aura rien à changer à l'appareil primitif, si ce n'est le rappel du chariot au zéro, ce qui s'obtient avec facilité (1).

Dans l'inscription des vitesses d'un mouvement de translation, on pourra également recueillir, à son gré, la courbe des espaces parcourus ou celle des vitesses de marche. Le premier mode d'inscription fournirait des courbes analogues à celles dont l'administration se sert pour le contrôle du service des chemins de fer. Le second mode aurait l'avantage de fournir, sur un papier sans fin, des tracés correspondant à la vitesse obtenue sur des parcours extrêmement étendus.

(1) On obtient ce rappel avec un désembrayage électro-magnétique qui laisse rétrograder le chariot sous l'action d'un contre-poids.

IX. — Inscription de la vitesse des fluides à l'intérieur des conduits.

1re *méthode*. — On force le liquide à traverser des espaces de capacités connues : Volkmann, Ludwig ; compteurs à cylindres ; inscription des quantités de liquide qui ont traversé un tube.

2e *méthode*. — Compteur à hélice. — Procédé basé sur l'emploi du pendule hydrostatique; Vierordt. — Mesure de la vitesse du sang d'après la déviation d'une tige flexible ; Chauveau.

3e *méthode*, basée sur l'emploi des tubes de Pitot.—Description de l'appareil. Courbes des vitesses du sang.

Vitesse d'écoulement des gaz; anapnographe, emploi des tubes de Pitot; vitesse du vent. — Réciproque des problèmes précédents : loch ; vitesse du mouvement d'un corps dans l'air.

Mouvement des liquides à l'intérieur des conduits.

Déterminer la vitesse avec laquelle un liquide chemine à l'intérieur d'un conduit fermé est assurément un des problèmes les plus ardus que les hydrauliciens aient eu à résoudre; c'est aussi un de ceux dont la solution intéresse le plus les physiologistes.

Pendant longtemps il régna sur la mesure de cette vitesse des idées fort erronées. C'est ainsi que Hales qui, le premier, adapta un manomètre aux artères des animaux, crut pouvoir estimer la vitesse du sang à l'intérieur de ces vaisseaux, du moment qu'il connut la pression à laquelle ce liquide est soumis. La vitesse, croyait-il, ne dépendait que du diamètre de l'artère explorée et de la pression à laquelle le sang y est soumis. Cette formule, qui permet, en effet, de calculer la vitesse de l'écoulement qui se fera par un orifice percé en *mince paroi*, n'est point applicable à la détermination des vitesses d'écoulement dans les conduits. Il peut arriver que, dans un conduit très-large, le liquide soit soumis à une pression énorme et

que pourtant ce liquide soit immobile ou doué d'une faible vitesse, parce que, dans le sens où le liquide tend à couler, il se trouve des passages étroits et résistants, situés parfois très-loin en aval du point que l'on observe.

La vitesse du liquide, dans un conduit long et accidenté, est presque impossible à calculer d'avance, à cause de la complexité des causes de résistance; mais on peut la déterminer expérimentalement. Les méthodes employées à cet effet peuvent se classer en trois genres principaux, suivant le principe sur lequel elles reposent.

Dans le premier genre de mensuration, on force le liquide à traverser des espaces fermés d'une capacité connue, et quand un ou plusieurs de ces espaces ont été traversés en un temps déterminé, on connaît la vitesse du courant.

Dans le second genre de mesure, on utilise la vitesse du liquide à produire certains effets mécaniques que l'on constate du dehors. Ainsi, on force le liquide à faire tourner une hélice, à dévier un pendule ou une aiguille qui plongent dans le courant.

Le troisième genre de mesure consiste à remonter aux causes mêmes de la vitesse et à les mesurer pour en déduire la vitesse elle-même. C'est ainsi qu'en explorant la pression du liquide en deux points d'un tube éloignés l'un de l'autre, on peut déduire la vitesse d'après la différence des pressions observées.

Nous examinerons successivement ces trois genres de mensurations. C'est à deux éminents physiologistes de l'Allemagne qu'il faut, je crois, faire remonter les premiers essais pour mesurer la vitesse d'un liquide en lui faisant traverser des espaces de capacités connues. Ces expériences avaient pour objet de déterminer la vitesse du sang dans les artères des animaux.

Le procédé de Volkmann est bien connu: il consiste à placer sur le trajet d'une artère un long tube en U rempli d'eau. A un moment donné, on force le sang artériel à traverser ce tube en poussant devant lui l'eau qui doit s'écouler par le bout inférieur du vaisseau. On mesure le temps que le sang met à se substituer à l'eau, ce dont on juge aisément, à travers les parois de verre, en voyant une colonne rouge che-

miner à l'intérieur du tube transparent. Quand le tube de verre est rempli, comme on en connaît la capacité et qu'on a mesuré le temps employé à le remplir, on a tous les éléments nécessaires pour déterminer la vitesse du mouvement dont le sang a cheminé. Mais, pour être autorisé à admettre que la vitesse observée est bien la vitesse normale du sang dans les artères, il faudrait démontrer que l'inertie de la colonne d'eau contenue dans le tube en U n'apporte qu'une résistance négligeable au mouvement du sang qui la pousse; il faudrait prouver aussi que l'eau qui passe du tube dans les artères et dans les capillaires y rencontre la même résistance que le sang y eût éprouvée.

Tous ces doutes qui planent sur la valeur de l'expérience de Volkmann l'ont fait à peu près abandonner des physiologistes ; cette méthode n'en reste pas moins un grand titre de gloire pour son auteur, car elle renferme un principe qui est susceptible d'applications très-précises.

Ludwig établit, sur le même principe, une méthode qui semble présenter une précision plus grande : elle consiste à faire passer le sang à travers des ampoules de verre de capacités connues. Voici en quelques mots comment se fait l'expérience. Deux ampoules semblables sont disposées l'une à côté de l'autre dans l'appareil de Ludwig ; l'une est pleine d'huile et l'autre pleine de sang. Ces ampoules communiquent entre elles par un conduit situé à leur partie supérieure ; en bas, chacune d'elles est en communication avec l'un des bouts de l'artère explorée. Au début de l'expérience, l'ampoule pleine d'huile est en rapport avec le bout supérieur du vaisseau. Le sang arrive dans l'appareil, pousse l'huile de la première ampoule dans la seconde qui, par son orifice inférieur, se vide, dans le bout inférieur de l'artère, du sang qu'elle contenait. Quand la substitution du sang à l'huile et de l'huile au sang est complète, l'appareil a été traversé par une quantité de sang égale à la contenance d'une des ampoules. Par un jeu de robinets, on change alors le sens du mouvement du sang et on le fait arriver dans l'ampoule où l'huile vient de passer, de façon à refouler dans le bout inférieur de l'artère le sang qui, tout à l'heure, était entré dans l'autre ampoule. Lorsque la substi-

tution est encore une fois terminée complétement, on constate qu'il a passé une quantité de sang égale à deux contenus d'ampoule et on renverse de nouveau le courant pour passer à une autre expérience, et ainsi de suite. Si l'on provoque ainsi une série de passages alternatifs du sang à travers l'appareil, on peut aisément déduire, du nombre de ces passages, le volume absolu du sang qui a coulé dans l'artère en un temps donné. En outre, d'après le nombre de mouvements alternatifs qui se sont produits en un même temps dans deux expériences différentes, on peut juger de la vitesse relative des deux courants sanguins mesurés.

Dogiel a exécuté de nombreuses mesures de la vitesse du sang, dans le laboratoire de Ludwig, au moyen de cet appareil. Pour simplifier l'expérience, et pour n'avoir pas à compter le nombre de fois qu'il tournait le robinet qui sert à inverser le courant, Dogiel faisait écrire, sur un cylindre tournant, chacun de ces mouvements du robinet, et déduisait, de leur nombre, le volume absolu du sang qui avait traversé l'appareil, ou de leur fréquence relative, la vitesse du sang dans le vaisseau.

Cette méthode doit fournir des mesures bien plus exactes que celle de Volkmann, d'abord parce que c'est toujours du sang qui sort de l'appareil pour pénétrer dans le bout inférieur du vaisseau (1), et que, par conséquent, ce sang doit circuler à travers les capillaires avec les résistances normales, ce qui n'avait certainement pas lieu pour l'eau de l'appareil de Volkmann. En outre, la précision des mesures de Ludwig s'accroit en raison même du nombre des mensurations successives qui sont faites. L'inversion possible du sens du courant permet de répéter indéfiniment ces mesures du débit sanguin, et d'atténuer beaucoup l'erreur qui pourrait se glisser dans une mensuration isolée.

Restent deux objections à faire à l'instrument : c'est que le jeu du robinet produit, à certains intervalles, des temps d'arrêt dans le mouvement du liquide et que, sous cette influence, la vitesse moyenne du courant doit diminuer. En outre,

(1) L'huile, par sa légèreté spécifique, surnage toujours au-dessus du sang et ne peut s'échapper par l'ouverture inférieure qui s'ouvre dans l'artère.

l'appareil de Ludwig ne peut donner que la mesure de la moyenne vitesse du mouvement du sang; or, un des points les plus intéressants peut-être de la circulation artérielle, c'est la détermination des phases singulières de la vitesse du sang aux différents instants de chaque révolution du cœur.

Dans ces dernières années, l'industrie a produit un compteur du liquide qui circule dans les conduits, basé sur un principe analogue. L'eau passe alternativement dans deux corps de pompe dont chacun est mis, tour à tour et d'une manière automatique, en rapport avec le bout supérieur puis avec le bout inférieur du tube dont on mesure le courant intérieur. Le nombre de ces coups de piston produits en un temps donné, révèle la quantité de liquide qui a traversé le tube, puisque chaque coup de piston correspond au passage d'un volume connu de liquide. Si l'on appliquait, à la fréquence de ces coups de piston, les procédés d'inscription précédemment indiqués pour traduire en courbe la fréquence des actes successifs, on aurait réalisé, sans doute, un des meilleurs appareils inscripteurs du mouvement des liquides dans les conduits.

Toutefois, un inconvénient existe dans l'emploi pratique de ces appareils : par cela seul que le jeu des pistons est automatique, c'est à la vitesse du liquide qu'est emprunté le travail nécessaire au mouvement des pompes alternatives. Si réduite que soit la quantité de travail ainsi dépensée, elle n'en constitue pas moins une cause d'altération du phénomène qu'il s'agit de mesurer.

La seconde manière de mesurer la vitesse du liquide est, avons-nous dit, d'employer cette vitesse à produire un travail que l'on mesure. Qu'une hélice plonge à l'intérieur du fluide en mouvement et que son axe engrène avec la série des mobiles d'un compteur, on lira, au bout d'un temps donné, le nombre de tours de l'hélice, d'où se déduira, avec une certaine approximation, la vitesse du courant. Si, au lieu d'un compteur à cadrans, l'hélice actionnait un appareil inscripteur des actes discontinus, elle donnerait une courbe assez précise des phases de la vitesse du courant.

Ce procédé a été également employé à déterminer la vitesse des courants d'air dans les cheminées; l'anémomètre rotatif

de Robinson est encore un instrument de même ordre. Tous ces appareils gagnent beaucoup à être rendus inscripteurs, car leurs indications ayant surtout une valeur relative, il y a tout avantage à dégager clairement, au moyen d'une courbe, les phases variables du phénomène étudié.

Presque toujours l'inertie de l'hélice immergée fait qu'elle n'obéit pas très-fidèlement aux variations du courant qui l'entraîne : elle résiste au début des accroissements de vitesse du fluide et elle ne subit pas instantanément les effets du ralentissement du courant. En conséquence, elle atténue l'intensité des variations du mouvement, et tend à n'indiquer qu'une valeur moyenne de la vitesse du liquide ; c'est le défaut commun à tous les appareils que nous avons passés en revue jusqu'ici.

On en peut dire autant d'un appareil imaginé par le physiologiste allemand Vierordt pour mesurer la vitesse du sang dans les artères. Cet instrument est basé sur l'emploi du pendule hydrodynamique dont la déviation, sous l'influence d'un courant de liquide, croît, dans un rapport connu, avec la vitesse de celui-ci. L'*Hémotachomètre* de Vierordt est trop connu pour qu'il soit nécessaire de le décrire ici ; la modification par laquelle son inventeur l'a transformé en un appareil inscrivant n'a pas enlevé les défauts de cet appareil qui sont encore les effets de l'inertie et l'obéissance très-imparfaite du pendule aux variations du courant sanguin.

Dans le même but que Vierordt, Chauveau construisit un autre instrument qu'il nomma *Hémadromographe* et qui, mieux que tous les autres appareils, atteint le but que l'auteur s'était proposé, à savoir l'inscription des plus légères variations de la vitesse du sang.

Un tube que le courant sanguin traverse porte une fenêtre latérale fermée par une membrane de caoutchouc. Dans cette fenêtre est implantée une aiguille dont une extrémité plonge dans le courant, tandis que l'autre reste au dehors. La partie de l'aiguille qui est immergée subit, de par le courant, des déviations plus ou moins fortes et plus ou moins rapides ; celle qui est au dehors du tube exécute, et écrit sur une surface animée de mouvement, des déviations pareilles, mais de sens inverse. L'emploi de l'appareil de Chauveau a

révélé des particularités fort intéressantes de la vitesse du sang artériel; il a montré que chaque ondée sanguine lancée dans les artères y produisait des saccades multiples dans lesquelles on lit les effets de la systole ventriculaire, ceux de la clôture de valvules sigmoïdes de l'aorte, ceux enfin des oscillations longitudinales de la colonne sanguine à l'intérieur des vaisseaux élastiques qui la contiennent.

Il n'y a pas lieu de revenir sur les résultats que fournit l'appareil de Chauveau; ils ont été publiés avec de grands détails par cet éminent physiologiste et par plusieurs de ses élèves.

Le troisième genre de mesure des vitesses d'un liquide est basé sur la détermination de la pression dans deux tubes de Pitot. J'ai longuement développé, dans le volume de l'année dernière, le principe sur lequel est basée la construction de cet explorateur de la vitesse d'un courant de liquide; j'ai insisté sur l'avantage qui résulte de l'étude comparée de la vitesse et de la pression du sang dans une artère, et crois avoir prouvé que, sans cette double notion, on ne peut avoir une idée exacte des conditions dans lesquelles se fait un courant de liquide dans un tube, et tout particulièrement des conditions dans lesquelles le sang circule dans les artères. Je renverrai donc à ces études (1) le lecteur qui désirerait de plus amples détails, et citerai, en terminant, quelques applications du même appareil à des mesures analogues.

Certains physiologistes ont cherché à obtenir le tracé de *la respiration*, non pas d'après les mouvements que le thorax exécute, ainsi qu'on en a vu des exemples au chapitre VI, mais d'après la vitesse avec laquelle l'air est inspiré et expiré tour à tour. Sous le nom d'*Anapnographe*, MM. Bergeon et Kastus ont présenté un instrument comparable à l'hémotachomètre de Vierordt et basé sur le même principe.

Une planchette rectangulaire verticale est suspendue, par son bord supérieur, à l'intérieur d'une caisse que traverse, en

(1) *Pression et Vitesse du sang. Travaux du laboratoire*, 1re année, p. 338.

sens divers, l'air inspiré ou expiré. Les mouvements de cette planchette se transmettent au dehors par le prolongement de l'axe autour duquel elle oscille; ces mouvements peuvent s'écrire par les procédés ordinaires. Or, on peut s'assurer que la planchette de l'anapnographe n'obéit pas fidèlement aux mouvements alternatifs de l'air respiré. D'autre part, je me suis convaincu de la fidélité parfaite avec laquelle s'écrivent les phases de la vitesse de l'air respiré, lorsqu'on place au-devant de la bouche un appareil semblable à celui que j'ai proposé pour inscrire la vitesse du sang. Ainsi, bien que les mouvements respiratoires me paraissent susceptibles d'une étude plus précise par l'inscription des mouvements thoraciques que par celle du courant d'air lui-même, je pense que ce dernier mode d'inscription pourrait, en certains cas, avoir de l'intérêt.

Enfin, il faut considérer que les mouvements des fluides, par rapport aux instruments qui plongent dans leur intérieur, produisent sur le manomètre différentiel précisément les mêmes effets que si le liquide était immobile, tandis que l'appareil, étant immergé, se transporterait avec pareille vitesse. Aussi ai-je essayé d'utiliser les inscripteurs de vitesse pour mesurer la translation d'un navire et pour construire un nouveau loch à indications continues.

La description de cet instrument a été donnée récemment (1); il s'agissait alors d'un loch à cadran dont l'aiguille marque sans cesse le degré de vitesse d'un navire. Il y aurait intérêt, sans doute, à faire de ce loch à indications continues un appareil inscripteur traçant, sur une bande sans fin, toutes les phases de la vitesse du navire.

La translation de tubes manométriques dans l'air immobile fournit, d'une manière analogue, des courbes de pression d'où peut se déduire la vitesse du mouvement de translation des appareils, lorsque, par des expériences préalables, on a mesuré la pression manométrique de l'air pour chaque vitesse de translation de ces mêmes instruments (2). Enfin, l'inscription

(1) *Journal de physique*, t. V, p. 184.
(2) Voir pour ces expériences, *Travaux du laboratoire*, 1re année, p. 215.

de la vitesse du vent d'après les courbes manométriques qu'il donne est peut être la meilleure solution que puissent adopter les météorologistes ; en effet, nul autre appareil ne traduit d'une manière plus rapide les variations capricieuses des mouvements de l'air.

X. — Inscription des changements de volume.

Difficulté de la mesure des volumes par les procédés géométriques. — Facilité de cette mesure par les méthodes expérimentales de déplacement. — Déplacement d'un volume d'eau que l'on mesure; déplacement d'un volume de gaz qui produit un changement de pression dans un espace clos, de capacité connue. — Inscription du volume d'eau déplacé, appareils et expériences de Mosso. — Inscription des compressions que subit un certain volume de gaz; appareil de Buisson; expériences de François-Franck. — Comparaison des deux méthodes. — L'inscription des changements de volume conduit à celle des changements de poids, de température, etc.

Autant les procédés de la géométrie sont d'un emploi difficile pour mesurer le volume d'un solide de forme compliquée, autant les procédés expérimentaux présentent de simplicité, de rapidité et de certitude. Plonger un corps dans l'eau et mesurer le volume du liquide déplacé, telle est l'essence de cette méthode dont l'invention appartient à Archimède. La physique moderne s'est enrichie de procédés qui permettent de mesurer avec une assez grande rigueur le volume d'un corps qu'on ne peut pas plonger dans l'eau. Les procédés de Say et de Regnault ont rendu de grands services; ils sont basés sur le principe suivant :

Étant connue la capacité d'une enceinte pleine d'air, on fait varier cette capacité d'une quantité également connue et on note l'élévation de pression qui s'ensuit.

On introduit alors le corps à mesurer dans la même enceinte et on en fait varier comme tout à l'heure la capacité. Il se produit, dans cette deuxième expérience, un changement de pression plus grand que dans la première, parce qu'on a agi sur un volume d'air diminué de tout ce qui correspond au volume du corps introduit dans le réservoir. C'est de cette différence de pression que se déduit le volume du corps à mesurer.

Ainsi, il y a deux moyens de connaître le volume d'un corps : c'est de mesurer le volume d'eau qu'il déplace ou le

degré de compression qu'il produit dans un gaz au sein duquel il est introduit. Modifiés suivant les besoins particuliers, ces deux moyens se prêtent aux expériences les plus variées et se plient fort bien aux exigences de la méthode graphique ainsi qu'on va le voir.

1° *Mesure par déversement.* — Ce n'est pas seulement le volume d'un corps, mais les changements de ce volume qu'on doit mesurer; supposons donc que le corps en question soit immergé dans un vase plein d'eau, on organise le déversement de telle sorte que le liquide arrive, par un tube, au fond d'une éprouvette graduée. Dans ces conditions on voit à chaque instant, d'après l'élévation du niveau dans l'éprouvette, de combien le corps augmente en volume ; si au contraire le volume du corps immergé diminue, cela se traduit par un abaissement du niveau dans l'éprouvette dont le liquide est alors aspiré.

Or, on a déjà vu les moyens d'inscrire les changements du niveau d'un liquide dans un vase au moyen d'un flotteur qui, selon qu'il s'élève ou s'abaisse, actionne, dans un sens ou dans l'autre, le style écrivant. Si les changements de volume sont faibles et déplacent peu de liquide, il est préférable de recourir à l'éprouvette flottante décrite précédemment. Les oscillations qu'elle exécute traduisent les changements de volume du corps immergé.

C'est là le procédé dont Mosso s'est servi pour mesurer les variations que subit un organe sous l'influence des changements qui se produisent dans la circulation du sang à son intérieur. On a vu, dans le mémoire n° 1, quelle était la disposition employée par Mosso ; comment cet habile expérimentateur a rendu sensibles et mesurables les moindres variations du calibre des petits vaisseaux sous les influences vaso-motrices.

L'avantage de l'appareil de Mosso dans les évaluations physiologiques est qu'il fournit, du premier coup, la valeur absolue du changement de volume qui s'est produit dans l'organe immergé. Les divisions de l'ordonnée des courbes inscrites sont toujours proportionnelles à la quantité de liquide versé dans l'éprouvette. La valeur de ces divisions peut être

déterminée, une fois pour toutes, par une graduation de l'appareil.

2° *Mesure d'après les changements de pression.* — Sur l'autre principe, celui qui mesure la force élastique d'un gaz comprimé, est basée la construction d'un autre inscripteur physiologique des changements de volume. Cet appareil est décrit dans le mémoire n° 1 sous le nom d'appareil de Buisson : M. François-Franck a exposé, dans ce travail, la série de phases qu'a traversées cette méthode de mensuration des changements de volume des organes, depuis les recherches de Piégu qui semble en être l'inventeur, jusqu'aux derniers perfectionnements qui consistent dans l'inscription des changements de volume au moyen du tambour à levier.

Des expériences de M. François-Franck, le lecteur a dû retirer cette conviction, que nulle méthode n'est capable de traduire, avec une précision pareille, les rapides changements qui peuvent survenir dans le volume d'un organe. L'appareil de Mosso trace, en quelque sorte, la courbe du volume moyen, sans pouvoir, à cause de son inertie, exprimer les variations incessantes qui se font autour de ce moyen volume. Tout en ayant plus de mobilité, ce qui lui permet d'exprimer les phases, parfois si rapides, du changement de volume d'un organe, le tambour à levier n'en est pas moins capable d'exprimer, par la hauteur des courbes qu'il trace, la valeur absolue de ces changements. Il faut graduer expérimentalement l'échelle des courbes inscrites par l'appareil, ce qui se fait en introduisant dans le flacon où est contenu l'organe en expérience, des quantités d'eau connues et graduellement croissantes. On mesure alors quel changement survient dans la hauteur de la courbe tracée pour chaque introduction d'un, de deux, de trois centimètres cubes de liquide et l'on construit ainsi une échelle qui exprime les valeurs réelles des variations de l'organe immergé.

La seule précaution à prendre, c'est de renouveler cette graduation à propos de chaque expérience, car la quantité dont le levier de l'instrument s'élève, pour chaque variation d'une unité de volume, dépend de la quantité d'air contenue dans l'appareil, et de la sensibilité de la membrane élastique

du tambour employé. Du reste, ces mesures des valeurs absolues d'un changement de volume n'ont, en physiologie, qu'une utilité très-limitée ; on n'a presque jamais intérêt à les déterminer. Il me semble donc que l'appareil à levier inscripteur est préférable, dans tous les cas, pour les recherches physiologiques.

Il n'en est pas de même pour les déterminations des physiciens qui, presque toujours, ont besoin d'obtenir des valeurs numériques précises et se trouveront mieux alors de l'emploi de la première méthode.

Nous n'avons cité, dans ce chapitre, que les expériences qu'on peut faire en physiologie sur le volume des organes; mais il est un grand nomdre de recherches que cette méthode d'inscription rapide rendra possible aux physiciens, aux chimistes, etc.

Considérons, par exemple, le cas de ces réactions chimiques où la combinaison de deux corps s'accompagne d'une augmentation de volume du produit, ou, au contraire, d'une condensation. Ces actions, jusqu'ici, ne sont connues que dans leur résultat final : le volume du composé diffère de la somme des deux volumes qui sont entrés dans la combinaison. Or, dans ce conflit des atomes, n'y a-t-il pas des lois du mouvement aussi précises que celles de la chute du corps? Ces actions ne varient-elles pas dans des rapports définis, suivant la température, l'état électrique ou la pression ambiante? Il y a certainement là un champ aussi étendu qu'intéressant à explorer.

Enfin, dans l'inscription des changements de volume, nous avons le moyen indirect d'étudier avec précision et de représenter par des courbes fidèles d'autres changements d'état non moins intéressants, tels que les changements de poids, de température, d'état électrique, de pression, les phénomènes d'osmose, etc. On verra plus loin de nombreuses applications de ces méthodes.

XI. — Inscription des changements de pression.

A. *Mesure de la pression à l'intérieur des organes.*

Introduction du manomètre en physiologie ; manomètre à mercure ; kymographion de Ludwig. — Le mercure ne traduit pas fidèlement les variations rapides de la pression ; mesure des moyennes ; manomètre compensateur. — Moyen d'inscrire avec le tambour à levier les indications du manomètre à mercure. — Manomètres élastiques, leur mobilité ; sphygmoscope ; manomètre Bourdon appliqué par Fick ; manomètre métallique inscrivant par un tambour à levier. — Comparaison expérimentale des différentes sortes de manomètres. — Graduation des manomètres inscripteurs ; importance de ne pas transmettre la pression au manomètre par l'intermédiaire d'une longue colonne de liquide.

Depuis que l'emploi du *manomètre* a été introduit en physiologie par Hales, cet instrument a subi des modifications nombreuses destinées à rendre son application plus facile et ses indications plus sûres. Hales adaptait aux ar-

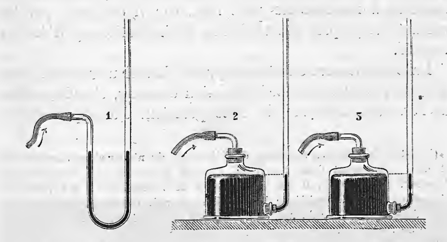


Fig. 93. — Différents types de manomètres à mercure. — 1. Manomètre de Poiseuille. 2. Manomètre de Guettet. — 3. Manomètre compensateur.

tères d'un grand mammifère un simple tube de verre dans lequel le sang lui-même, s'élevant jusqu'à une hauteur d'environ 6 pieds anglais, marquait ainsi la pression à laquelle il est soumis dans les artères. A ce tube incommode et fragile,

Poiseuille substitua l'emploi du *manomètre à mercure*. Ce fut d'abord un tube de verre courbé en U (1, fig. 93) dont une des branches communiquait par un ajutage effilé avec le sang d'une artère. La dénivellation du mercure exprimait la valeur de la pression cherchée (1).

Le plus important perfectionnement qu'ait reçu le manomètre à mercure est celui par lequel Ludwig en fit un appareil inscripteur qu'il désigna sous le nom de *kymographion*. Ce fut, je crois, la première introduction d'un appareil inscripteur en physiologie. Aujourd'hui, l'usage de cet instrument est très-répandu; on n'étudie plus guère les pressions, dans l'organisme animal, sans inscrire les variations qu'elles présentent.

J'ai longuement discuté ailleurs (2) la valeur des indications que fournit en physiologie le manomètre à mercure et je crois avoir démontré que cet appareil n'est bon que pour donner la valeur d'une pression qui reste constante ou du moins qui ne varie qu'avec une extrême lenteur, mais que, pour la plupart des usages physiologiques, et particulièrement pour mesurer la pression du sang dans les artères, le manomètre à mercure ne vaut rien, car il déforme, par les oscillations propres de sa colonne, les indications qu'il devrait fournir.

La seule mesure exacte que puisse donner un manomètre à mercure, relativement à la pression du sang, c'est la mesure de la valeur moyenne de cette pression. J'ai appelé *mano-*

(1) Cette dénivellation résultant de l'élévation du niveau dans une branche et de l'abaissement dans l'autre, il s'ensuit qu'une échelle centimétrique d'après laquelle on lirait les changements de niveau d'une des branches n'exprimerait que la moitié de la pression qui agit sur l'instrument; il faut donc doubler la valeur du mouvement produit dans la branche libre du manomètre de Poiseuille.

Les oscillations du mercure sont deux fois plus étendues si l'on emploie la disposition suivante adoptée par Guettet (2, fig. 93). D'un large flacon plein de mercure se détache une colonne manométrique verticale. La pression agit sur la surface du mercure contenu dans le flacon et, grâce à la grande étendue de cette surface, le changement de niveau, à peine sensible dans le flacon, se produit presque tout entier dans la colonne manométrique. Les choses se passent, pour cet instrument, comme pour un baromètre muni d'un large réservoir.

(2) *Physiologie médicale de la circulation du sang*, p. 141.

mètre compensateur (3, fig. 93) l'instrument qui me sert à ce genre de mesures.

Un manomètre ordinaire, pareil à celui de Guettet, porte une colonne large d'environ 5 millimètres, séparée du flacon à mercure par un tube capillaire assez fin. Cette étroitesse empêche la colonne d'osciller sous l'influence des variations cardiaques de la pression du sang ; aussi voit-on le mercure rester sensiblement fixe à un niveau qui exprime la valeur moyenne de la pression dans les artères. On peut, avec avantage, remplacer le tube capillaire par un robinet situé à la base de la colonne manométrique ainsi que l'a fait Setschenow. Le manomètre peut ainsi éteindre, d'une manière plus ou moins complète, les saccades de la pression et arriver plus vite à son point d'équilibre.

Dans les cas où l'emploi du manomètre à mercure pourra être conservé, il est un mode d'inscription qui m'a semblé préférable à celui de Ludwig. On sait que le savant professeur de Leipzig se sert d'un flotteur qui accompagne les mouvements du mercure et qui porte à son extrémité une pointe écrivante. Or, l'emploi du flotteur exige qu'on inscrive les indications du manomètre sur un cylindre tournant dont l'axe soit vertical. C'est là une grande incommodité, surtout lorsqu'il faut inscrire en même temps un certain nombre de phénomènes. Au moyen d'un tambour à levier, on peut inscrire avec une facilité extrême les mouvements de la colonne de mercure. Voici comment on s'y prend :

On applique le tube de transmission par l'air en haut de la colonne manométrique, de sorte que le déplacement du mercure fait l'office d'un piston qui foulerait ou aspirerait de

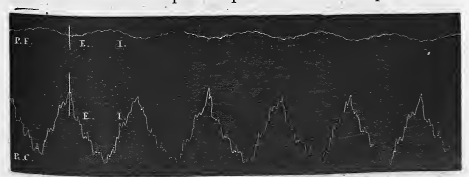


Fig. 94. — PF. Pression fémorale du lapin avec le manomètre à mercure (transmission par l'air). — RC. Courbes respiratoires et cardiaques.

l'air du tube manométrique jusque dans le tambour à levier.

La figure 94 montre un tracé obtenu dans ces conditions; il est en tout semblable à celui que donnerait le flotteur de Ludwig, mais obtenu dans des conditions plus faciles.

Pour rendre plus sensibles les indications de l'instrument il faut adopter la forme de l'*hémomètre* de Guettet qui donne le maximum d'amplitude aux excursions de la colonne de mercure. En outre, il faut choisir un tube large pour servir de colonne manométrique, afin qu'un changement de niveau d'une certaine hauteur corresponde à un déplacement d'air suffisamment grand (1).

Enfin, pour réduire autant que possible l'espace nuisible plein d'air qui sert à la transmission, on peut remplir d'eau la cavité du tambour à levier qui inscrit les oscillations manométriques.

Ce ne sont là que des moyens de perfectionner l'application du manomètre à mercure; on va voir quel genre d'appareil doit lui être substitué pour obtenir les tracés fidèles d'une pression qui présente de brusques changements.

Des manomètres élastiques. — Dès les premières expériences que je fis avec Chauveau sur la circulation du sang, je fus frappé de l'infidélité du manomètre à mercure, infidélité qui se prouve d'une manière indiscutable par l'expérience suivante :

Élevons à un certain niveau la colonne d'un manomètre à mercure en soufflant dans l'appareil, puis, cessant de souffler, laissons la colonne retomber de son poids. Le mercure ne s'arrêtera pas, comme il devrait le faire, au zéro de la graduation, mais oscillera un certain nombre de fois avant de s'y arrêter. C'est en supprimant cette colonne pesante animée de vitesse qu'on supprimera cet effet nuisible. Or, on peut toujours remplacer la pression d'un poids par la tension d'un corps élastique, c'est ce principe qui a présidé à la construction de cer-

(1) Toutefois, il faut proportionner le volume du tube d'un manomètre à la taille de l'animal sur lequel on veut expérimenter. Pour une pression donnée, un manomètre loge dans son intérieur une quantité de sang proportionnelle à la section de sa colonne. De sorte que, prendre la pression artérielle d'un petit animal avec un manomètre de gros calibre, ce serait produire dans l'appareil une véritable hémorrhagie qui ferait tomber beaucoup la valeur de la pression à mesurer.

tains manomètres : le manomètre élastique de Bourdon, le manomètre à air comprimé, etc.

Le premier manomètre élastique dont je me suis servi est l'appareil que j'ai désigné sous le nom de *sphygmoscope* et dans lequel on fait arriver la pression du sang à l'intérieur d'une poche élastique en caoutchouc dont les différents degrés de dilatation s'inscrivent au moyen du tambour à levier.

Une construction spéciale n'est pas nécessaire pour avoir un bon sphygmoscope ; on trouve les éléments nécessaires dans tous les laboratoires. La figure 95 montre la façon d'assembler ces différentes pièces.

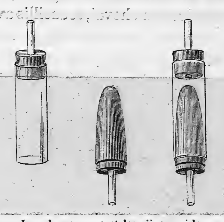


Fig. 95. — Le sphygmoscope et les pièces qui le composent.

A gauche de la figure, on voit un tube de verre gros et court fermé à l'un de ses bouts par un bouchon de caoutchouc percé d'où sort un tube de verre.

Au milieu de la figure est la seconde pièce de l'appareil formée d'un bouchon de caoutchouc traversé, comme le précédent, par un tube de verre et coiffé d'un doigtier de caoutchouc.

En introduisant la deuxième pièce dans la première, on obtient le sphygmoscope complet, tel qu'il est représenté à droite de la figure.

Après avoir rempli d'une solution alcaline et bien purgé d'air le doigtier de caoutchouc, on adapte à une artère le tube qui se rend dans son intérieur, puis on met en communication avec un tambour à levier l'autre tube qui communique avec l'intérieur du manchon de verre.

La fonction du sphymoscope est très-simple ; chaque augmentation de pression subie par le sang qui pénètre à l'intérieur de l'ampoule élastique déplace, en gonflant cette ampoule, une partie de l'air contenu dans le manchon de verre qui l'enveloppe. Ce déplacement d'air agit sur le tambour à levier comme cela se passe dans un grand nombre d'appareils déjà décrits. Il se produit dans la petite ampoule exactement le même phénomène que dans l'expérience décrite chapitre premier où les changements du volume de la main et de l'avant-bras, sous l'influence des changements de la pression intérieure du sang, s'inscrivent avec tous leurs détails.

La figure 96 est un tracé des changements de la pression du sang dans les artères du cheval, recueillis avec le sphygmoscope.

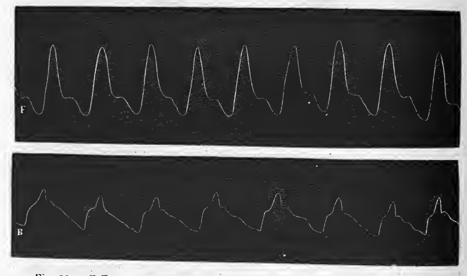


Fig. 96. — F Tracé de la pression de la faciale du cheval recueilli au sphygmoscope. B. Tracé de la carotide du même animal.

Le sphygmoscope est basé sur le même principe que les sondes exploratrices de la pression du sang dans les différentes cavités du cœur ; ces appareils, qui sont décrits sous le nom de *sondes cardiaques* dans les comptes rendus des expériences de cardiographie (1), sont de véritables sphygmo-

(1) Voyez *Physiol. méd. de la circulation*, p. 60 et suiv., et *Dictionnaire encyclopédique des sciences méd.*, art. Cardiographie.

scopes qui, au lieu de présenter l'élasticité de leur membrane à une force expansive intérieure, reçoivent cette pression de dehors, puisqu'elles plongent dans le milieu comprimé.

On peut varier de maintes manières la forme de ces manomètres élastiques, soit qu'on aille chercher par un tube la pression dans le milieu qu'il s'agit d'étudier et qu'on envoie cette pression à l'intérieur de l'ampoule élastique, soit qu'on la fasse agir à la surface de cette ampoule, comme dans les expériences de la cardiographie.

Frappé également des inconvénients du manomètre à mercure, le professeur Fick introduisit, en physiologie, l'emploi d'un manomètre élastique construit avec le tube métallique de Bourdon. Sous le nom de *federkymographion*, cet auteur indique la disposition qu'il donne à l'appareil. Par suite des changements de pression qui existent à son intérieur, le tube métallique du manomètre change de courbure ; ces mouvements sont amplifiés et inscrits par un levier, suivant les procédés ordinaires. Fick reconnut que, dans son appareil, il existait encore des effets de l'inertie se traduisant par des vibrations de la pointe écrivante ; pour les combattre, il associa aux mouvements du levier inscripteur un petit piston qui oscille dans un cylindre plein d'huile, ce qui crée des résistances aux mouvements trop rapides.

Quoique préférable au manomètre à mercure, le manomètre de Fick est d'un emploi peu commode, surtout quand on doit le faire écrire en même temps que d'autres instruments. Le sphygmoscope, si facile à construire, me semble pouvoir le remplacer dans tous les cas. Toutefois, comme le sphygmoscope s'altère assez vite, comme, avec le temps, la force élastique de la membrane de caoutchouc qui le constitue peut changer, et que cet appareil est un peu difficile à graduer avec exactitude, j'ai adopté, dans ces derniers temps, une disposition nouvelle dont voici la description.

Manomètre métallique inscripteur. — (Fig. 97.) A l'intérieur d'un vase métallique plat est placée une capsule de baromètre anéroïde remplie de liquide et s'ouvrant à l'extérieur par un tube qui traverse la paroi du vase enveloppant ; ce tube se termine dans un flacon rempli de liqueur alcaline, au goulot duquel se rend un ajutage *a* muni d'un robinet. Un tube vertical de

verre surmonte le vase qui enveloppe le manomètre, et par ce tube, on verse de l'eau jusqu'à ce qu'on ait rempli le vase et même la moitié du tube.

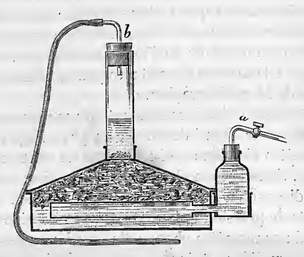


Fig. 97. — Manomètre métallique inscripteur.

Si l'on fait agir une pression positive ou négative à l'intérieur de la capsule, on voit s'agiter le niveau de l'eau dans le tube de verre; l'appareil fonctionne comme un grand sphygmoscope dont une membrane de métal remplacerait la membrane de caoutchouc (1).

Enfin, pour inscrire les mouvements du manomètre métallique, on introduit dans le tube vertical où l'eau fait ses oscillations, un bouchon de caoutchouc percé qui force l'air déplacé du grand tube à passer, par un tube plus petit *b*, dans un tambour à levier inscripteur.

Les indications de cet instrument m'ont donné une satisfaction parfaite; c'est le dernier type de manomètre inscripteur auquel je me sois arrêté jusqu'ici (2).

Comme exemples des tracés recueillis avec le manomètre

(1) L'eau qu'on verse dans le vase-enveloppe est destinée à accroître la sensibilité de l'instrument en comblant l'espace trop vaste que l'air occuperait sans cela, ce qui éteindrait en partie le mouvement par suite de la compressibilité de l'air.

(2) A titre de perfectionnement, il est bon de remplir, avec des fragments d'éponge, la partie supérieure du vase-enveloppe qui contient de l'eau, et même d'en introduire dans la partie inférieure du gros tube de verre où monte le liquide. Cette précaution empêche que, dans les variations brusques de la

élastique inscripteur, on trouvera dans la figure 98 les courbes de la pression du sang dans l'artère carotide d'un lapin.

Je n'entreprendrai pas de discuter la valeur relative des différentes sortes de manomètres, en me basant sur la théorie des vibrations, sur les inconvénients d'employer dans les appareils inscripteurs des masses considérables susceptibles de se mouvoir avec vitesse. Ce point de vue a été discuté ailleurs; je me bornerai ici à un contrôle expérimental des différentes sortes de manomètres. Pour cela il vaut mieux recourir à la méthode que Donders a employée avec beaucoup de succès dans le contrôle des appareils inscripteurs qui agissent sur le tambour à levier. Ce procédé consiste à faire agir sur chacun des appareils une pression connue d'avance, et à voir avec quelle fidélité chacun d'eux la traduit (1). De ces expériences il résulte que le sphygmoscope et le manomètre métallique

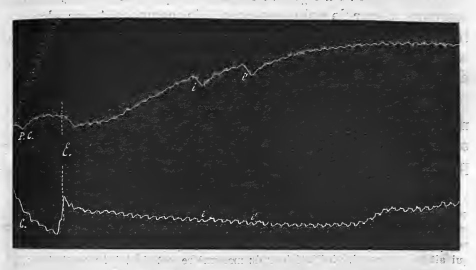


Fig. 98. — P. C. Pression carotidienne du lapin recueillie avec le manometre métallique (transmision par l'air). C. Pulsations du cœur. (V. Mémoire VI.)

pression, les parois de l'anéroïde et le liquide qui les surmonte n'entrent en vibration, ce qui produirait, en petit, les inconvénients du manomètre à mercure et altérerait le tracé de la même façon.

(1) *Première expérience.* On prend un réservoir plein d'air à la pression de 0,10 centimètres; on fait subitement arriver cette pression dans un manomètre à mercure et l'on devrait, théoriquement, obtenir le tracé A, figure 99; mais le mercure, ajoutant ses oscillations propres au mouvement que la pression lui

donnent de fidèles indications et que si l'on considère la facilité avec laquelle ces instruments se combinent avec d'autres pour les inscriptions simultanées, il semble qu'on doive leur donner la préférence.

Dans la figure 100, la ligne supérieure M et la seconde ligne Ssont obtenues toutes deux simultanément sur les schéma de la circulation. La ligne M est fournie par un manomètre à mercure, S par le sphygmoscope. En comparant ces deux tracés, le manomètre à mercure se montre paresseux; il absorbe le dicrotisme que le sphygmoscope écrit clairement; enfin il donne des tracés moins amples et plus arrondis.

Dans les tracés E et F on a comparé entre eux le manomètre métallique E et le manomètre de Fick. Ce dernier instrument se montre encore paresseux et ne donne que des pulsations éteintes. (*Voir*, pour d'autres détails sur les incon-

commande, fournit le tracé B; un sphygmoscope et un manomètre métallique inscripteur donnent tous deux sensiblement la même courbe C; enfin un manomètre de Fick, le tracé D; or, il est bien clair que le maximum de pression qui ait pu se produire à l'intérieur du manomètre est égal à 10 centimètres, et que tout instrument qui a tracé une courbe dépassant ce niveau d'équilibre où il devrait s'arrêter, est un instrument défectueux et possède des oscillations propres.

Le manomètre à mercure, avec ses oscillations multiples si prononcées est le plus défectueux, le manomètre de Fick semble donner un tracé plus fidèle que celui du sphygmoscope ou du manomètre métallique inscripteur, attendu que le tracé du manomètre de Fick ne présente pas d'élévation au-dessus du niveau de la ligne. Mais cette absence de vitesse acquise est achetée dans cet appareil au prix d'une paresse qui se traduit par une inclinaison très-prononcée de la ligne ascensionnelle de la courbe. En somme, c'est le sphygmoscope ou le manomètre métallique qui est le plus exact de tous.

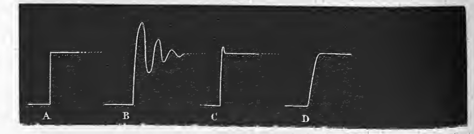


Fig. 99. — Schéma des indications comparées fournies par les différents manomètres.

Deuxième expérience. Sur un *schéma* de la circulation, je choisis un tube-artère, le même pour tous les manomètres, et j'applique successivement ceux-ci à la mesure de la pression dans cet appareil; je constate que les tracés ne

vénients du manomètre de Fick, le mémoire VIII sur la pression et la vitesse du sang.)

Graduation des manomètres élastiques. — Tous les manomètres élastiques sont des instruments à échelles arbitraires qui ont besoin d'être gradués comparativement avec un étalon. Cet étalon est précisément le manomètre à mercure qui, lorsqu'il est soumis à des pressions constantes, est entièrement à l'abri des causes d'erreur précédemment signalées. Cette graduation pourrait être faite pour chaque instrument une fois pour toutes, car l'élasticité du métal ne varie pas sensible-

sont pas identiques et que le manomètre à mercure fournit une courbe dans laquelle le nombre des ondulations tracées pourrait souvent induire en erreur sur le nombre réel des pulsations qui se sont produites. On peut en juger par la figure 100.

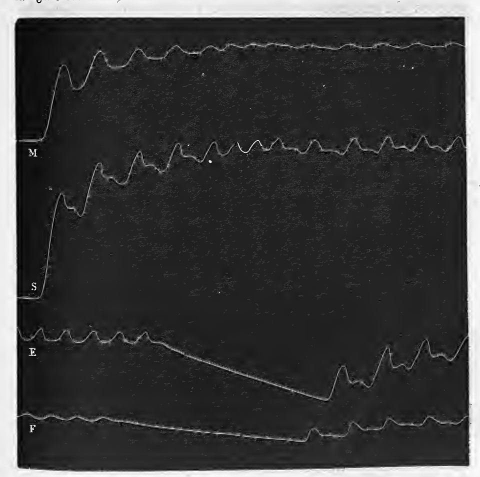


Fig. 100. — Inscription simultanée de la pression artérielle sur le schéma avec des instruments différents.

ment : mais le tambour à levier qu'on adapte au manomètre métallique n'a pas toujours la même sensibilité ; c'est là ce qui exige une graduation avant ou après chaque série d'expériences (1) lorsqu'on veut obtenir la valeur absolue de la pression.

Conditions du transport de la pression au manomètre inscripteur. — Un des points les plus importants pour obtenir des mesures graphiques exactes de la pression d'un liquide c'est de *transmettre cette pression au moyen de la colonne liquide la plus large et la plus courte possible.* Sans cette précaution, si la pression varie brusquement, la colonne liquide intermédiaire à la source de pression et au manomètre est susceptible de prendre des mouvements oscillatoires qui peuvent déformer les tracés, tout autant que le font les oscillations propres du manomètre à mercure. Un autre inconvénient de l'inertie d'une longue colonne liquide, c'est que, dans les variations rapides de pression, la courbe n'exécute qu'une partie de l'excursion qu'elle eût dû marquer. On verra plus loin les erreurs qu'a produites, en physiologie, la transmission de la pression du sang par un tube de trop grande longueur. Plus le tube de transmission s'allonge, plus se déforme la courbe tracée, à cause des oscillations propres à la colonne liquide qui sert à cette transmission (2).

Mais, dira-t-on, il est souvent indispensable d'écrire, l'une à côté de l'autre, les courbes de pression de deux artères qui sont très-éloignées l'une de l'autre sur l'animal ; dès lors les tubes de transmission seront ordinairement inégaux.

On peut transmettre sans inconvénient à de grandes distances les indications d'un appareil au tambour à levier qui

(1) On procède d'une manière très-simple : un tube branché apporte la pression d'un réservoir à air dans un manomètre à mercure par l'une de ses branches ; par l'autre, dans le manomètre métallique inscripteur dont il s'agit de graduer les indications. La pression étant à zéro, on fait tracer par le levier inscripteur une ligne sur le cylindre : ce sera le zéro de l'échelle. Puis, un aide insuffle de l'air dans le réservoir jusqu'à ce que le manomètre à mercure accuse un centimètre de pression ; on fait alors tracer le levier sur le cylindre, ce qui fournit le 1er degré de l'échelle manométrique ; on porte ensuite la pression à 2 centimètres de mercure et on s'y arrête de nouveau pour tracer le 2e degré, et ainsi de suite jusqu'à ce que l'échelle soit tracée dans une étendue suffisante pour l'usage auquel l'instrument est destiné.

(2) Mémoire VIII, *Pression et vitesse du sang.*

doit les inscrire, à la condition que cette transmission se fasse au moyen d'un tube à air dans lequel l'oscillation de la colonne fluide est négligeable (1). Il suffit donc, pour parer à tout inconvénient, de placer le manomètre très-près du vaisseau où l'on va chercher la pression, afin de transmettre celle-ci par la plus courte colonne liquide possible; quant à l'oscillation de l'eau du manomètre, on en transmet les effets au tambour à levier au moyen d'un tube aussi long qu'il est besoin, cela ne saurait altérer sensiblement le tracé (2).

Ce qu'on vient de lire relativement à la pression du sang artériel s'applique également bien à celle du sang veineux. Le manomètre métallique inscripteur peut être construit avec des capsules plus ou moins sensibles et s'appliquer à la mesure de très-faibles pressions, positives ou négatives, telles qu'on en observe dans les cavités splanchiques, l'espace sous-arachnoïdien (3), la cavité des plèvres, etc.

(1) Dans certaines expériences très-délicates faites sur des transmissions de mouvements très-rapides, en myographie, par exemple, il faut tenir compte de l'existence de cette onde aérienne oscillante ; on l'empêche en insinuant dans le tube un petit tampon de coton peu serré.

(2) Ce principe a présidé à la construction des appareils cardiographiques. Il eût été plus facile d'introduire dans les cavités du cœur des tubes qui eussent amené à l'intérieur d'un sphygmoscope le sang dont nous voulions étudier la pression ; mais il se fût trouvé alors, dans l'inertie de la colonne sanguine, des causes de déformation du tracé : diminution de l'amplitude de la courbe ou oscillations secondaires, suivant les cas. Il fallait surtout éviter ces inconvénients. C'est pour cela que les grands animaux permettent seuls de bonnes expériences de cardiographie; car seuls, ils se prêtent à l'exploration des pressions avec des ampoules manométriques directement immergées dans le liquide exploré, c'est-à-dire sans transmission de la pression par une colonne liquide.

(3) *Voir* le Mémoire de M. Salathé sur le mécanisme de la circulation dans la cavité céphalo-rachidienne.

XII. — Inscription des changements de pression.

B. *De la pression des fluides explorée à travers les parois qui les contiennent.*

Importance, au point de vue des applications médicales, des appareils qui n'exigent pas de mutilation. — La pression du sang d'une artère se mesure à la contre-pression nécessaire pour la surmonter; théorie du pouls. — Inscription du pouls; sphygmographe direct; sphygmographe à transmission. — Mesure absolue de la pression dans les artères de l'homme, d'après la contre-pression extérieure qui lui fait équilibre.

Pulsation du cœur; explorateurs appropriés aux différents animaux : grenouille; mammifères de grande taille; petits mammifères.

Moyen de reproduire fidèlement les tracés qui présentent des détails délicats et que le décalque pourrait déformer.

La précision même des résultats que l'emploi du manomètre fournit en physiologie fait souhaiter qu'on puisse transporter à l'homme les résultats si faciles à obtenir sur les animaux. Il faudrait disposer d'une sorte de manomètre qui n'exigeât pas de mutilation. Cet appareil existe; il y a même plusieurs sortes d'instruments qui permettent de mesurer sur l'homme la pression du sang artériel ou du moins les variations qu'elle éprouve sous certaines influences. Les sphygmographes ou inscripteurs du pouls, les appareils déjà décrits paragraphe X et qui traduisent par des courbes les changements de volume des organes, sont d'excellents inscripteurs des variations de la pression du sang dans les vaisseaux.

Pour prouver que c'est bien la pression artérielle qui, par ses variations, produit les phénomènes pulsatiles dans les tissus vasculaires, je dois revenir, en quelques mots, sur la théorie du pouls, théorie qui a été pendant longtemps discutée et sur laquelle, peut-être, n'est-on pas entièrement d'ac-

cord aujourd'hui. Voici la définition que je donnais de ce phénomène en 1861: *Le pouls est la sensation que le doigt éprouve des changements de la pression du sang dans les artères;* et plus loin: *Pour avoir conscience de ces changements de pression, il faut déformer le calibre du vaisseau: faire perdre à l'artère sa forme cylindrique grâce à laquelle tous les points de sa paroi offrent une égale résistance à la pression intérieure exercée par le sang.* Ainsi, dans la palpation du pouls, la pression du doigt qui déprime l'artère se substitue à la force élastique de la paroi du vaisseau et lutte contre la pression du sang.

Cette définition ne s'applique pas seulement à la pulsation artérielle; on peut la transporter également à la *pulsation du cœur* (1), qui tient, en grande partie du moins, au durcissement subit qu'éprouve cet organe au moment où il se resserre sur le sang qu'il renferme et le soumet à une pression énergique. Ainsi, c'est à la souplesse des parois des vaisseaux et à celle des cavités du cœur, que l'on doit de pouvoir constater aisément le plus ou moins de pression auquel est soumis le sang qu'elles renferment, et d'éprouver une sensation tactile de poussée plus ou moins énergique, tout à fait correspondante à ce que le manomètre nous révèle dans les changements qu'éprouvent la pression artérielle et la pression intra-cardiaque.

Ce n'est pas ici le lieu de rappeler par quelles phases diverses a passé l'invention du sphygmographe. J'ai essayé de tracer l'historique de cette question (2) et de montrer qu'un bon inscripteur du pouls doit réaliser les mêmes conditions qui ont été décrites dans le paragraphe XI à propos du manomètre élastique. En effet, c'est la force élastique d'un ressort qui doit déprimer les parois du vaisseau; en outre, dans les organes qui transmetttent, amplifient et inscrivent le mouvement que le pouls imprime au ressort élastique, il faut éviter tout ce qui ferait naître des oscillations propres, capables de déformer le tracé (3).....

Depuis la publication de mes travaux sur ce sujet, j'ai

(1) *Voy.* 1re année, *Travaux de labor.*, p. 57.
(2) *Physiol. méd. de la circulation*, p. 168.
(3) *Ibid.*, p. 178.

donné au sphygmographe une forme nouvelle qui assure encore mieux la fidélité de ses indications. Je rends le levier léger qui inscrit les pulsations artérielles absolument solidaire du ressort qui presse sur l'artère. De cette façon, il est impossible, quelle que soit la vitesse avec laquelle il est agité, que le levier inscripteur abandonne les organes qui lui transmettent le mouvement et soit projeté plus haut qu'il ne devrait l'être réellement.

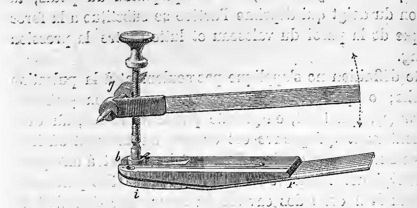


Fig. 101.—Disposition nouvelle du ressort et du levier du sphygmographe : *i*, plaque d'ivoire qui s'appuie sur l'artère avec une pression qui dépend de la tension du ressort *r*; *b*, vis verticale qui, par un mouvement de bascule, s'applique contre un galet *g* avec lequel elle engrène, de manière à entraîner le levier inscripteur.

Je me borne à représenter figure 101 cette nouvelle disposition par laquelle une vis reliée au ressort de pression vient presser dans la gorge d'une poulie molletée à laquelle elle imprime, à chaque pulsation artérielle, une rotation d'un cer-

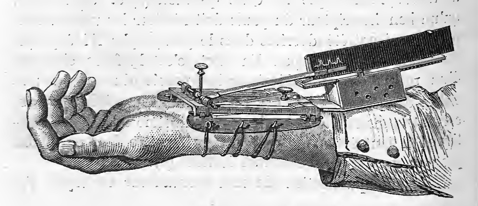


Fig. 102. — Sphygmographe direct en position sur le poignet.

tain nombre de degrés, mouvement que le levier amplifie et inscrit.

La figure 102 montre le sphygmographe appliqué sur le poignet et inscrivant les pulsations de l'artère radiale. Enfin, la figure 103 représente un tracé fourni par cet instrument, dans les conditions de santé, sous l'influence d'un *effort*.

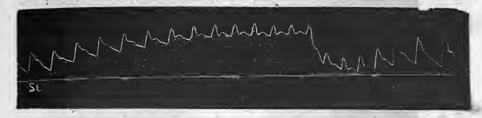


Fig. 103. — Tracé du pouls pendant un effort, la glotte étant fermée.

Ce que traduit le sphygmographe, c'est la façon dont la pression varie dans une artère, abstraction faite de la valeur absolue de ces variations et de la valeur moyenne de la pression du sang dans le vaisseau. Les tracés du pouls sont de même ordre que ceux de la pression artérielle inscrits avec un manomètre élastique.

L'identité des deux sortes de tracés devient évidente lorsqu'on compare la courbe du pouls radial à celle qu'une artère de moyen calibre du cheval fournit au manomètre élastique. L'identité est parfaite encore entre la courbe du pouls et celle que donnait l'inscription des changements du volume de la main et de l'avant-bras pendant la durée d'un effort et après que l'effort avait cessé. Ce tracé qui est reproduit figure 104 est, en réalité, celui d'un manomètre élastique. En effet, qu'est-ce qu'un avant-bras plongé dans l'appareil plein d'eau, si ce n'est un manomètre basé sur l'élasticité des tissus vivants ?

Le sang qui afflue dans les innombrables vaisseaux de l'organe les dilate à chaque ondée envoyée par le cœur. Cette dilatation est très-faible pour chaque partie limitée du réseau vasculaire, mais la somme de tous ces petits effets qui s'ajoutent dans le vase totalisateur où le bras est plongé, constitue un déplacement suffisant pour qu'on puisse l'inscrire avec une grande netteté.

Ainsi, le sphygmographe fournit les mêmes indications

qu'un manomètre élastique ; il renseigne sur les variations que subit la pression du sang dans les artères. Mais n'y a-t-il pas moyen de graduer les indications du sphygmographe ? Ne peut-on pas savoir quel est le degré réel de la pression du sang dans les artères d'un homme ?

Cette préoccupation semble avoir tourmenté beaucoup certains médecins qui ont adopté l'usage du sphygmographe et qui, reconnaissant la supériorité des tracés du pouls sur les impressions tactiles, ont cru que l'instrument pouvait donner plus encore. Ils lui ont demandé aussi la valeur absolue de la pression du sang, d'après le degré de contre-pression que le ressort doit développer pour donner le tracé du pouls avec le maximum d'amplitude. Plusieurs médecins praticiens firent construire des vis graduées destinées à exprimer le degré de tension qu'elles donnent au ressort, et, d'après ces degrés, croyaient mesurer la pression du sang. Ces tentatives ne peuvent donner aucun résultat. En effet, l'effort que le sang exerce contre le ressort de l'instrument ne tient pas seulement à l'intensité de la pression à laquelle le sang est soumis à l'intérieur du vaisseau, il tient encore à l'étendue de la paroi vasculaire sur laquelle agit cette pression sanguine, c'est-à-dire à la grosseur du vaisseau exploré.

Sur un même sujet, la pression sera sensiblement la même dans toutes les artères, mais elle produira un plus grand effort sur les plus gros vaisseaux

Fig. 104. — Changements du volume de la main pendant et après l'effort. L'effort commence au point marqué par un trait sur la ligne horizontale servant d'abscisse ; il cesse au moment de la chute du tracé. (Héliogravure.)

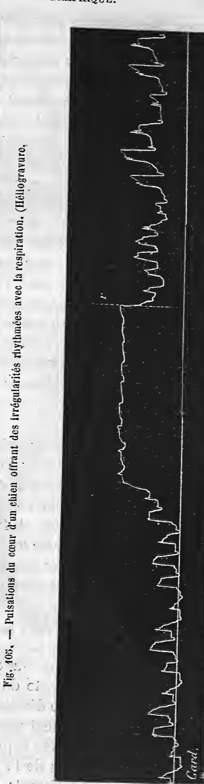


Fig. 105. — Pulsations du cœur d'un chien offrant des irrégularités rhythmées avec la respiration. (Héliogravure.)

Fig. 106. — Pulsations du cœur de l'homme; influence de la respiration. Au milieu de la figure les mouvements respiratoires sont arrêtés pendant un instant en inspiration; ils reprennent au point *r*. (Héliogravure.)

et nécessitera une pression plus grande du sphygmographe pour déprimer la paroi artérielle et manifester le phénomène du pouls. C'est ainsi que les deux radiales d'un même sujet, explorées toutes deux au même instant, peuvent ne pas nécessiter la même pression du ressort du sphygmographe : les deux radiales peuvent en effet avoir un calibre différent. Est-ce à dire que la pression n'est pas égale dans toutes deux ? Et si un anévrysme résiste à une contre-pression de plusieurs kilogrammes, tandis que 100 grammes suffisent à aplatir l'artère radiale du sujet porteur de la tumeur, est-ce à dire que la pression du sang est plus grande dans la poche que dans le vaisseau ?

La mesure de la pression dans les artères de l'homme est cependant déterminable ; on peut l'exprimer avec sa valeur manométrique réelle en exerçant, tout autour d'un membre, une contre-pression que l'on mesure manométriquement et qu'on élève graduellement jusqu'au moment où le sang artériel cesse de pénétrer dans le membre. On verra dans le mémoire n° VIII comment ces mesures ont été obtenues et combien leur valeur se rapproche de celle qu'on observe sur les grands mammifères.

La pression du sang dans les ventricules du cœur se traduit extérieurement, avons-nous vu, par une pulsation analogue à celle des artères. L'étude de ce phénomène a été traitée l'an dernier avec les détails qu'elle comporte ; je me bornerai à montrer fig. 105, 106, 109 et 110 quelques types de ce genre de pulsations, à signaler les perfectionnements que j'ai récemment introduits dans les appareils et l'extension que j'ai donnée à la méthode d'inscription de la pulsation cardiaque.

Pulsation du cœur chez les petits animaux.

Pour inscrire la pulsation du cœur de la grenouille, on emploiera avec succès une sorte de pince à cuilleron (fig. 107) dont le mode d'emploi a été décrit dans le mémoire n° II ; on a vu, dans ce travail, comment varie la forme de la pulsation du cœur suivant la force avec laquelle on comprime la masse ventriculaire entre les mors de la pince.

Sur l'homme, après différents tâtonnements, je me suis

arrêté à un type d'appareil explorateur qui fournit des tracés

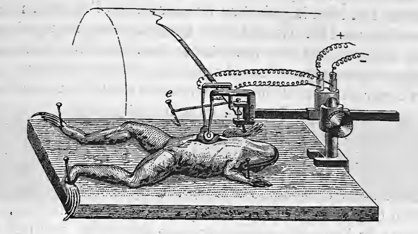


Fig. 107. — Pince myographique pour le cœur de la grenouille.

excellents toutes les fois que la pulsation cardiaque existe (1).

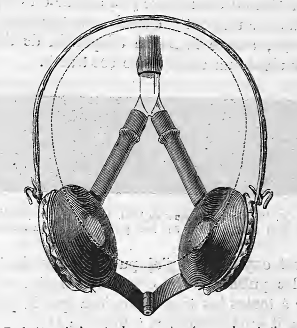


Fig. 108. — Explorateur à deux tambours conjugués pour la pulsation cardiaque des petits animaux.

(1) Il ne faut pas oublier que la pulsation extérieure n'est pas un signe constant de la systole des ventricules et que chez certains sujets, même dépourvus d'embonpoint, il est impossible de percevoir cette pulsation au toucher ; l'appareil explorateur ne saurait non plus en révéler l'existence (*a*).

(*a*) Voir, pour ce qui est relatif à l'application de l'instrument et à l'étude de la pulsation cardiaque, *Trav. du lab.*, 1re année, p. 19 à 41.

Enfin, chez les petits mammifères, lapin, cobaye, etc., on inscrit fort bien la pulsation du cœur avec l'appareil représenté figure 108. Ce sont deux tambours dont la membrane est soulevée par des ressorts-boudins. Ces deux tambours, articulés au moyen d'une charnière, s'ouvrent tous deux dans un tuyau en Y dont la branche terminale aboutit à un tambour à levier. On recueille ainsi, dans un même tracé, la somme des pulsations explorées par les deux tambours. En effet, chez les petits mammifères dont il vient d'être parlé, le cœur occupe une situation à peu près médiane, dans l'angle dièdre situé derrière le sternum. On place l'explorateur de façon que la charnière s'applique sur la ligne médiane, le thorax de l'animal occupant l'espace représenté par une ellipse ponctuée, fig. 108; on a soin que le cœur soit saisi entre les deux tambours explorateurs comme entre les mors d'une pince. Un lien de caoutchouc jeté autour du corps de l'animal, et fixé par un bout à chacun des tambours, au moyen d'un crochet, assure la bonne adaptation de l'appareil. La figure 109 monte un exemple de ces tracés.

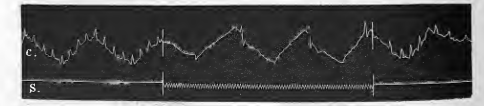


Fig. 109. — C. Pulsations cardiaques du lapin, avec courbes respiratoires, recueillies sur l'axe lent. (Effet de l'excitation du bout périphérique du pneumogastrique. ligne S.)

Avec cet explorateur, j'ai pu écrire pendant des heures entières les pulsations du cœur d'un lapin, ce qui permet d'assister à toutes les transformations que la pulsation cardiaque subit sous différentes influences (1).

Enfin, grâce à l'existence de deux explorateurs situés l'un en face du cœur droit, l'autre en face du cœur gauche, on peut recueillir isolément la pulsation de chaque moitié du cœur. Il suffit pour cela de comprimer la branche du tube en V qui correspond au côté du cœur dont on ne veut pas

(1) Voir le mémoire de François-Franck, portant le nº VI et relatif aux *arrêts réflexes du cœur.*

recueillir la pulsation. Malgré la solidarité des deux cœurs, on constate à l'état normal une différence assez sensible entre la pulsation des deux ventricules. Il est probable que, dans certains troubles de la circulation pulmonaire, on verrait la différence de ces deux pulsations s'accuser davantage.



Fig. 110. — Pulsations du cœur du lapin recueillies avec une vitesse de rotation de 0,012mm par seconde.

La figure 109 montre le tracé du cœur d'un lapin recueilli sur un axe lent. La figure 110 le montre inscrit sur un axe rapide. On choisit l'une ou l'autre vitesse de rotation du cylindre suivant qu'on veut obtenir la pulsation très-détaillée, ou qu'on veut, pendant longtemps, en suivre les modifications.

Ces différents explorateurs de la pulsation cardiaque se rapprochent beaucoup de l'appareil déjà décrit dans ce recueil sous le nom de *sphygmographe* à transmission (1). Ce dernier appareil, lorsqu'il inscrit les tracés du pouls, en même temps qu'un explorateur du cœur recueille les pulsations cardiaques, permet de faire d'utiles rapprochements entre les caractères de ces deux sortes de phénomènes si intimement liés l'un à l'autre.

On a vu, par certains exemples, quelle richesse de détails présente, en certains cas, la courbe des pulsations du cœur et des artères ; on retrouve ces mesures délicates dans les tracés myographiques et dans bien d'autres cas. Le moment me semble venu d'indiquer les différents procédés au moyen desquels on peut, sans les altérer, reproduire ces figures par la typographie.

(1) Voyez *Travaux du labor.*, 1re année, p. 343.

DE LA REPRODUCTION FIDÈLE DES TRACÉS GRAPHIQUES.

Lorsqu'une expérience fournit des tracés très-délicats, riches en inflexions de toute sorte dont chacune présente nécessairement une signification, il est d'une grande importance, pour la publication de ces tracés, de les reproduire avec une fidélité parfaite. Les expérimentateurs qui ont eu recours à la méthode graphique n'ont peut-être pas été suffisamment frappés de cette importance; ils ont abandonné la reproduction du graphique à des dessinateurs qui croient avoir rempli leur tâche en imitant l'aspect général des courbes, sans s'attacher à la scrupuleuse reproduction de tous les détails. Aussi, dans les publications françaises, on constate avec regret qu'il n'est peut-être pas un tracé sur vingt qui soit absolument fidèle.

Assurément, les tracés défectueux dont je parle montrent ce qu'ils doivent montrer dans le cas particulier; l'auteur qui les publie a surveillé la reproduction de telle ou telle inflexion de la courbe dont il connaissait et voulait expliquer la signification; mais, presque toujours, il a négligé de contrôler l'exactitude des parties du tracé dont la valeur lui a échappé; n'y trouvant pas d'intérêt actuel, il a souvent laissé passer des formes défectueuses qui rendent la figure qu'il publie entièrement inutile et même dangereuse à consulter pour ceux qui voudraient y chercher des renseignements nouveaux.

Or, l'essence de la méthode graphique est de fournir des courbes dont le sens se dégagera de plus en plus complétement, grâce aux études successives dont elles seront l'objet. C'est parfois sur une courbe vieille de 15 ans qu'on trouve la vérification d'une hypothèse qui vient de se présenter à l'esprit. Et ce n'est pas un des moindres avantages de la méthode que de fournir des milliers d'expériences, toujours présentes, que l'on peut compulser, comparer et interroger à tout instant.

Tant que les appareils inscripteurs ne seront pas arrivés à leur forme définitive, tant qu'on n'aura pas admis un type satisfaisant qui inscrive les phénomènes avec des amplifications ou des réductions toujours semblables pour des actes physio-

logiques semblables entre eux, la comparaison des tracés recueillis par les différents auteurs sera toujours difficile. Un mouvement respiratoire, une pulsation du cœur, une secousse de muscle présenteront des aspects divers s'ils sont recueillis avec des appareils différents. De sorte que les tracés publiés dans différents pays et avec des appareils divers ne constitueront pas une sorte de collection d'expériences toutes faites, livrées à l'interprétation du public scientifique. Toutefois, le lecteur prévenu des conditions dans lesquelles un tracé a été recueilli pourra, s'il en a acquis une certaine habitude, trouver dans ce tracé des détails que personne n'aura aperçus avant lui et faire ainsi d'importantes découvertes. Mais, pour cela, le tracé doit être d'une fidélité irréprochable ; si la reproduction de la courbe n'a pas été entourée de soins minutieux, celle-ci n'est bonne, tout au plus, qu'à montrer le phénomène pour la démonstration duquel elle a été gravée; elle doit être rejetée pour tout autre usage.

Le meilleur moyen pour obtenir, avec une fidélité absolue, un cliché typographique d'une courbe, c'est de recourir à l'*héliogravure* (1). Outre qu'on supprime ainsi l'intervention de la main de l'homme, on peut, à volonté, amplifier ou réduire les tracés qui ne seraient pas à une échelle convenable sur l'original.

Ce procédé serait fort coûteux si l'on n'avait qu'une seule courbe à reproduire, mais si l'on peut rassembler un grand nombre de tracés qu'on dispose les uns à côté des autres, de façon à couvrir un rectangle qui ait les dimensions des plus grandes plaques héliographiques, on a, sur une seule planche de cuivre, une série de 30 ou 40 figures dont chacune, découpée et montée à part fournit un cliché irréprochable et d'un prix assez peu élevé.

D'autres procédés moins parfaits peuvent encore trouver leur place lorsqu'il n'est pas possible de recourir à l'héliogravure.

Ainsi *la photographie sur bois* livre au graveur une image,

(1) Presque toutes les figures des mémoires de M. François-Franck ont été reproduites par ce procédé.

agrandie ou réduite au besoin, mais toujours fidèle, d'une courbe dont le décalque eût présenté de grandes difficultés. Le graveur devra prendre grand soin de ne point s'écarter des traits qu'il doit reproduire ; on aura évité, du moins, par l'emploi de la photographie, toutes les causes d'erreur qui peuvent survenir dans le décalque d'une courbe et dans le transport renversé de cette courbe sur le bois.

Enfin, un procédé aussi bon que la photographie, mais beaucoup plus simple et plus expéditif, consiste dans le *transport direct* du tracé original sur le bois qui doit être gravé. Voici comment on fait ce transport :

Le tracé doit être recueilli sur un papier spécial, connu dans le commerce de Paris sous le nom de *papier à décalque*. C'est une feuille ordinaire sur laquelle on a étalé une couche de colle d'amidon et qui a été ensuite satinée. Ce papier doit être placé sur le cylindre de manière qu'il tourne en dehors sa face encollée sur laquelle le noir de fumée devra être déposé. Le tracé étant obtenu comme à l'ordinaire (notons que cette surface de colle bien satinée est particulièrement favorable au glissement de la plume écrivante), on le fixe au vernis et on le conserve dans un album jusqu'au jour où l'on a besoin de le reproduire.

On découpe alors un morceau bien rectangulaire du tracé, ayant la justification du livre auquel il est destiné, puis, prenant un bois à graver de dimension pareille, on enlève la gouache qui se trouve ordinairement sur la face où doit être fait un dessin. On étend sur cette face une couche d'une solution tiède de gélatine à 3 0/0 environ, et on frotte cette surface avec le doigt pour bien étendre la gélatine qui sèche peu à peu. Quand toute la gélatine est presque sèche, et quand la surface du bois n'est plus qu'un peu gluante, c'est le moment favorable pour transporter le tracé sur le bois préparé. La face qui a reçu le tracé doit être appliquée sur la gélatine, puis, on frotte légèrement sur le dos du papier afin d'assurer l'adhérence des deux surfaces et on laisse sécher.

Aussitôt que la préparation est sèche, on la plonge dans l'eau de façon à humecter fortement le papier qui portait le tracé. Au bout d'une minute à peine on peut prendre ce pa-

pier par un de ses angles et le détacher entièrement du bois. Le papier qui se décolle est absolument blanc; il a laissé sur le bois tout le noir de fumée dont il était couvert et sur ce noir on voit se détacher, avec une pureté parfaite, la courbe qu'il s'agissait de transporter en la retournant comme cela doit être fait pour préparer le travail du graveur.

Ce procédé, extrêmement expéditif, est plus pratique que la photographie sur bois ; en s'exerçant un peu avec des tracés qu'on ne craint pas de détruire, on arrive bien vite à acquérir l'habitude suffisante et à éviter les accidents qui, parfois, font que l'original est perdu sans qu'on ait réussi à le transporter sur le bois. Lorsqu'un original est précieux et difficile à reproduire, nous ne conseillerons pas aux débutants d'en risquer le transport direct. Mieux vaudra recourir à la photographie sur bois et surtout à l'héliogravure.

Enfin, le transport des tracés peut se faire sur verre aussi bien que sur bois. On obtient par ce procédé de véritables clichés transparents, soit pour faire des projections avec la lanterne magique, soit pour amplifier considérablement les courbes dont l'œil, même armé de la loupe, ne pourrait saisir tous les détails.

VI

EFFETS DES EXCITATIONS DES NERFS SENSIBLES SUR LE CŒUR, LA RESPIRATION ET LA CIRCULATION ARTÉRIELLE,

par le Dr FRANÇOIS-FRANCK.

> « L'arrêt du cœur ou syncope peut succéder à toute action « perturbatrice violente et subite de quelque nature qu'elle « soit.» (Cl. Bernard, *Subst. toxiq. et méd.*, p. 232.)

INTRODUCTION ET HISTORIQUE.

Le point de départ de ces recherches est dans le fait que nous avons constaté accidentellement avec le professeur Marey, d'un arrêt prolongé des battements du cœur et de la respiration chez un lapin sous les narines duquel fut placée une éponge imbibée de chloroforme (1).

(1) Ces troubles cardiaques avaient déjà été étudiés par plusieurs physiologistes. Je connaissais le travail de M. Krishaber (*a*), quand le professeur Dogiel (de Kasan) m'apprit qu'il avait le premier (*b*) indiqué et cherché à interpréter cet arrêt du cœur observé dans les conditions où je l'avais noté moi-même, et il me signala un passage de la Toxicologie de Hermann (*c*), dans lequel je trouvai, en effet, les principaux résultats obtenus sur ce sujet : il y est fait mention des expériences de MM. Holmgreen et Grade (*d*), Hering et Kratschmer (e), et Hermann résume ainsi l'opinion des différents auteurs que je viens de citer :

« Chez les animaux, immédiatement dès le début de l'inhalation, on observe

Le mécanisme de ces phénomènes a été exposé par le professeur Marey dans son Cours du collége de France, au mois de février de cette année, d'après les expériences que suscita l'observation précédente.

J'ai longuement suivi cette étude en utilisant les précieuses méthodes de dissociation des fonctions que nous fournit la connaissance de la spécialité d'action de certains poisons; les sections et les dégénérescences des nerfs dont le rôle était à déterminer dans ces actes complexes, m'ont aussi donné le moyen de circonscrire assez nettement le trajet suivi par les

« un ralentissement passager qui va quelquefois jusqu'à l'arrêt complet de la « pulsation du cœur et de la respiration.

« D'après Dogiel, Holmgreen et d'autres, la condition est l'intégrité du nerf vague. Elle repose aussi sur une excitation du centre d'arrêt cardiaque par la muqueuse des voies respiratoires. Le siége primitif de l'excitation sensible paraît être dans la muqueuse du nez et produite non par l'olfactif, mais par le trijumeau.

« Cependant Dogiel a observé aussi des effets analogues en introduisant des vapeurs par une fistule trachéale, en sorte que la muqueuse respiratoire tout entière peut produire l'arrêt réflexe..... A côté de l'affaiblissement du cœur se produit une paralysie de la tonicité artérielle, laquelle jointe à la première cause produit une diminution considérable de la pression artérielle. » (Traduction littérale.)

Je ne discute ici aucun des différents points énoncés dans la citation empruntée à Hermann : je rappelle seulement les opinions.

Il faut y ajouter celles du professeur Rutherford (*f*) qui sont à peu près d'accord avec les précédentes sur le mécanisme de l'arrêt du cœur, et qui ont pris en Angleterre une certaine importance par l'appui que les expériences du professeur anglais ont fourni aux interprétations des cas de mort *sous* le chloroforme (under chloroform). « Richardson, dit M. Willième (*g*), s'appuyant sur les données des expériences de M. Rutherford, conclut que les patients, au début de l'administration du chloroforme, ont succombé à l'action directe des vapeurs sur les nerfs périphériques des surfaces respiratoires : le spasme a fait cesser la respiration, et *les vagues, stimulés par le sang asphyxié, ont empêché le cœur de continuer ses mouvements* » (?)

Enfin le Dr Lauder Brunton (*h*) a bien voulu me communiquer ses intéressantes recherches sur la syncope et sur le « *shock* », et j'y ai puisé les plus utiles renseignements.

(*a*) Krishaber, *Arch. de Phys.*, 1869, p. 542.

(*b*) Dogiel, 1866 (cité par Hermann et communication orale).

(*c*) Hermann, *Toxicol.*, p. 254, texte allemand.

(*d*) Holmgreen et Grade. — Upsal. 1867.

(*e*) *Wiener Litz. Bericht*, 1870, Abt. II.

(*f*) Rutherford, 1869.

(*g*) Willième. Rapport sur l'anesthésie chirurgicale. Congrès de Bruxelles. — Bruxelles, 1876.

(*h*) Lauder Brunton. *On the pathology and treatment of shock and syncope. Abernethian Society. St.-Bartholomew's Hospital*, 1874.

impressions douloureuses pour retentir sur les deux grandes fonctions de la circulation et de la respiration; enfin toutes les modifications provoquées expérimentalement ont été inscrites avec soin et les nombreux graphiques dont je reproduis quelques spécimens dans le cours de ce travail sont conservés dans les registres du laboratoire.

Mes expériences ont été le plus souvent dirigées par mon maître le professeur Marey, et leurs résultats toujours soumis à son contrôle.

Les phénomènes cardiaques et respiratoires dont j'avais été témoin n'avaient rien de spécial aux excitations des narines : l'arrêt du cœur et de la respiration a été maintes fois observé chez les animaux soumis à une douleur intense et soudaine; chez l'homme, un grand nombre de syncopes et quelques morts subites paraissent aussi ne point reconnaître d'autre cause qu'une impression douloureuse quelle qu'en soit l'origine.

J'ai donc recherché avec soin, particulièrement dans les œuvres du professeur Cl. Bernard, tous les renseignements relatifs au retentissement des impressions douloureuses sur le cœur, et le résultat le plus général de ce relevé se trouve en tête de mon travail, dans l'épigraphe que j'emprunte au savant physiologiste : « L'arrêt du cœur ou syncope peut succéder à toute action perturbatrice violente et subite de quelque nature qu'elle soit (1). »

Mais à côté de cette formule si nette donnée par M. Cl. Bernard, j'ai rencontré, dans les auteurs que j'ai consultés, des assertions tout à fait contradictoires.

Peut-être les expérimentateurs s'étaient-ils placés dans des conditions différentes, et ces conditions mêmes étaient importantes à rechercher, car on pouvait supposer que le mécanisme par lequel les excitations des nerfs sensitifs ont paru à certains auteurs provoquer d'emblée l'accélération du cœur était tout différent de celui par lequel ces mêmes excitations en déterminent l'arrêt ou le ralentissement : il y avait là une raison pour entreprendre un travail spécial sur ce sujet.

Mais il est également permis de penser que les moyens employés pour suivre les effets cardiaques des impressions dou-

(1) Cl. Bernard, *Subst. toxiques et médicam.*, p. 232.

loureuses pouvaient n'avoir pas toujours eu la précision désirable, et n'étaient pas susceptibles de fournir des renseignements assez détaillés. .

Or, de ces procédés d'exploration, il en est sur lesquels on ne peut absolument pas compter. Ainsi le doigt appliqué sur la région précordiale d'un animal à pulsations cardiaques rapides, l'aiguille armée d'un petit drapeau et que l'on enfonce à travers la paroi thoracique dans la substance même du cœur, ces deux procédés, suffisants quand on veut constater dans leur ensemble des variations prolongées et très-marquées, deviennent illusoires dans la plupart des cas où il s'agit de saisir au passage une pause légère, ou de constater un intervalle un peu plus grand que normalement entre plusieurs systoles consécutives ; et ces conditions sont souvent réalisées dans les recherches dont nous nous occupons.

Il faut être beaucoup moins exclusif pour l'exploration des variations de la pression artérielle par le manomètre à mercure dont on se sert si habituellement. Il me paraît cependant fort difficile de décider, d'après la simple inspection des oscillations de la colonne de mercure, si l'une de ces oscillations est moins ample que celle qui l'a précédée, si les phases de repos diastolique du cœur sont un peu plus longues dans la série qui suit immédiatement l'excitation, et ce sont là pourtant les points importants à bien déterminer, car beaucoup d'excitations légères, comme on le verra par la suite, ne provoquent point d'autres phénomènes.

C'est déjà un grand progrès que d'inscrire ces oscillations du manomètre d'après le procédé introduit en physiologie par Ludwig, avec la pointe d'un flotteur qui suit tous les mouvements du mercure.

Mais ce procédé est-il toujours *suffisant?* Je n'ai point à revenir ici sur la discussion déjà faite depuis longtemps par le professeur Marey des inconvénients qui résultent de l'inertie du mercure, et de la réserve qu'il convient d'apporter dans l'interprétation des résultats qu'il fournit quand on étudie des variations de pression *rapides*. Je me contente d'insister sur la nécessité de contrôler les indications du manomètre par l'inscription simultanée des pulsations cardiaques.

L'exploration du cœur à travers la paroi thoracique est

praticable, facile même chez les animaux de petite taille qui servent le plus souvent à nos recherches, le lapin et le cobaye par exemple (1); on obtient ainsi des courbes cardiaques d'une richesse de détails qu'on ne saurait soupçonner sans en avoir fait l'épreuve, et, grâce à la disposition du double explorateur à tambour, on inscrit, en même temps que la pulsation du cœur, les mouvements respiratoires.

Or, pour atteindre mon but d'inscrire simultanément les variations de la pression carotidienne et les pulsations du cœur, j'avais essayé de transmettre par l'air à un second tambour enregistreur, placé à côté du premier, les oscillations de la colonne du manomètre. Afin d'obtenir de plus grandes excursions du mercure et par suite une plus grande amplitude du tracé, j'avais adopté le cardiomètre de Magendie au lieu de l'hémodynamomètre, dans lequel les oscillations de chaque branche sont plus faibles de moitié.

Les tracés comparatifs ainsi obtenus étaient déjà satisfaisants; mais le professeur Marey eut l'idée de substituer au manomètre à mercure un manomètre métallique qui nous a donné les plus heureux résultats. (*Voir* page 200.)

Ce nouveau manomètre, gradué d'après un manomètre à mercure est décrit et figuré dans le mémoire VI du professeur Marey. Je me contente donc de rappeler ici que son extrême sensibilité m'a permis d'inscrire avec les plus grands détails les variations de la pression carotidienne ou fémorale du lapin, en même temps que je recueillais les pulsations cardiaques.

Mais cette double inscription, qui nécessite une installation plus longue, une opération préalable, la ligature d'un vaisseau important, n'a été employée que pour les expériences

(1) M. Marey a fait construire dans ce but un explorateur formé de deux tambours dont la membrane de caoutchouc est tendue par un faible ressort intérieur et qui sont réunis l'un à l'autre par une charnière en forme de V, à écartement variable, On saisit entre les deux tambours qui terminent les branches de ce V, la gouttière sterno-costale dans laquelle repose le cœur, et les deux pulsations qu'on recueille à droite et à ganche sont réunies dans une même courbe par la fusion en un seul des deux tubes émanant des tambours à air. On transmet ainsi la pulsation cardiaque à une distance variable, et le tambour à levier inscripteur ordinaire la recueille, et l'écrit sur le cylindre à régulateur. (*Voir* page 213.)

où j'avais spécialement en vue l'étude des modifications de la pression artérielle dans leurs rapports avec les modifications cardiaques et respiratoires. Aussi n'en fournirai-je de tracés que dans la partie de ce mémoire qui traite de ce sujet.

PREMIÈRE PARTIE.

Effets des excitations des nerfs sensibles sur les mouvements du *cœur* et de la *respiration*.

J'étudierai, dans cette première partie, les phénomènes cardiaques et respiratoires qui suivent l'excitation des nerfs sensibles, réservant pour la seconde partie l'exposé des recherches sur les phénomènes vasculaires provoqués par les mêmes excitations. L'analyse de faits aussi complexes gagnera, je crois, à cette division; du reste, je résumerai à la fin de ce travail l'ensemble des variations cardiaques, vasculaires et respiratoires, en les rapprochant les unes des autres.

Le résultat constant d'une grande quantité d'expériences faites au laboratoire du professeur Marey, depuis le mois de février jusqu'au mois d'août 1876, peut être simplement résumé, en ce qui concerne les fonctions cardiaque et respiratoire, dans les propositions suivantes :

« 1° L'impression vive, quelque brève qu'elle soit, produite sur un nerf sensible (filets terminaux, tronc, racines), détermine toujours, *comme effet initial*, un ralentissement ou un arrêt diastolique du cœur.

«La condition nécessaire de cette perturbation est la conservation de l'appareil modérateur du cœur : *centres bulbaires*, *troncs* et *ganglions cardiaques terminaux* des pneumogastriques.

« Quand on supprime l'une de ces parties, le phénomène cardiaque cesse de se produire.

« 2° En même temps que le ralentissement ou l'arrêt du cœur, *et d'une façon tout indépendante*, on voit se produire la suspension de la respiration. »

Telles sont les conclusions essentielles qui résultent de l'analyse d'un grand nombre de faits.

Ce sont ces faits sur le détail desquels je dois insister maintenant.

CHAPITRE PREMIER.

VOIES DE TRANSMISSION CENTRIPÈTES DES EXCITATIONS PÉRIPHÉRIQUES.

§ I. — Excitations du trijumeau.

De tous les nerfs de sensibilité générale, le trijumeau paraît être doué de la délicatesse la plus grande ; parmi les différentes branches de ce nerf, la sous-orbitaire et les filets nasaux, reconnus particulièrement sensibles, ont été surtout l'objet de mes expériences.

Or, comme je le disais dans l'historique de cette question, on provoque, à coup sûr, des troubles cardiaques et respiratoires considérables en excitant les narines d'un lapin avec un liquide dont les vapeurs sont âcres et irritantes, comme le chloroforme, l'acide acétique, l'ammoniaque, etc.

On voit dans la figure 111 quel ralentissement considérable du cœur, accompagné d'un arrêt complet de la respiration, se produit quand on touche légèrement les narines du lapin avec une petite éponge imbibée de chloroforme. Les pulsations du cœur (ligne inférieure C) sont fréquentes au début du tracé ; les respirations, recueillies avec le pneumographe de Marey (ligne supérieure R), ont une fréquence moyenne. Au point E on touche rapidement les narines avec l'éponge : la respiration s'arrête aussitôt, et le ralentissement progressif du cœur commence à se produire une demi-seconde après l'instant de l'excitation.

J'ai employé, dans le cas précédent, l'excitation avec le chloroforme, mais il n'y a dans ces phénomènes rien qui

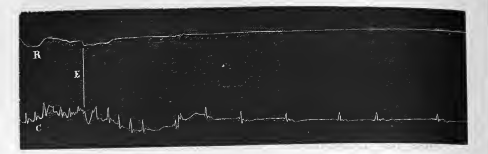


Fig. 111. — Pulsations cardiaques du lapin. (Ligne C.)
Respiration recueillie avec le pneumographe. (Ligne R.) La partie ascendante de chaque courbe correspond à l'expiration.
On excite les narines au point E. Arrêt de la respiration, ralentissement considérable du cœur.

soit particulier au chloroforme. Il est très-important d'être bien fixé sur ce point ; aussi (sans m'arrêter sur l'impossibilité de produire d'autre effet qu'une excitation violente et soudaine de nerfs sensibles par le simple contact du chloroforme), prendrai-je un autre exemple pour bien démontrer

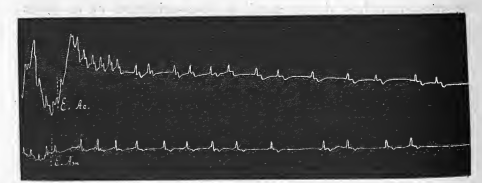


Fig. 112.—Arrêt respiratoire et ralentissement cardiaque produits par l'excitation nasale avec l'acide acétique (tracé supérieur), avec l'ammoniaque (tracé inférieur) (Héliogravure).

que la condition essentielle est que la substance dont on se sert soit plus ou moins irritante : j'ai réuni, dans la figure précédente (fig. 112) deux spécimens de ralentissement du cœur et d'arrêt de la respiration obtenus, le supérieur avec l'acide acétique, l'inférieur avec l'ammoniaque.

Dans ces deux tracés on peut constater, tout aussi bien que dans le type de la figure 111 obtenu avec le chloroforme,

que les battements du cœur, fréquents avant l'excitation (gauche des figures), se ralentissent très-notablement à partir du moment de l'excitation (Am.-Ac.), et qu'en même temps la respiration se suspend.

Le fait n'est donc pas douteux jusqu'ici : c'est bien la qualité irritante du liquide employé qui est ici en cause et non telle ou telle autre, sa propriété anesthésique, par exemple. D'autres preuves viendront bientôt, du reste, s'ajouter aux précédentes, quand nous verrons des agents tout différents, comme le chlore gazeux ou des excitations électriques assez intenses, produire des effets très-analogues.

Mais, si la question paraît évidemment tranchée en faveur de l'action purement irritante du liquide volatil employé, il est important de chercher si ces excitations agissent bien sur des nerfs de sensibilité générale, si *l'olfaction* n'est pas mise en jeu d'une façon exclusive ou partielle, quels sont enfin les filets nerveux impressionnés.

Les liquides dont j'ai parlé sont volatils, et leurs vapeurs sont non-seulement *irritantes*, mais *odorantes :* fallait-il tenir compte de ces deux propriétés réunies et admettre un double point de départ aux phénomènes cardiaques et respiratoires que provoque l'impression nasale avec ces substances? C'est ce que j'ai cherché à déterminer, et le récit de cette recherche prouvera qu'en réalité la question de l'olfaction pourrait bien, comme l'avait pensé Magendie et comme l'a également indiqué le professeur Cl. Bernard, n'être point complétement résolue dans le sens des données classiques.

Partant de l'opinion courante que les nerfs olfactifs sont en effet dévolus au sens de l'olfaction et y président tout seuls, j'ai détruit soigneusement sur plusieurs lapins les deux lobes olfactifs, petite opération dont l'animal est suffisamment reposé au bout de deux heures pour offrir, après une atténuation passagère, toutes les réactions de la sensibilité générale.

J'ai bien noté, après l'ablation des lobes olfactifs ce que je m'attendais à trouver, c'est-à-dire la persistance de modifications cardiaques et respiratoires; mais, d'une part, il me sembla tout d'abord que, pour une impression aussi comparable que possible aux impressions qui produisent de grands arrêts du cœur et de la respiration, je n'obtenais que *des*

effets moins accusés surtout du côté de la respiration ; d'autre part, mon expérience pouvait bien être en partie négative : en détruisant les lobes antérieurs du cerveau chez ces lapins, étais-je, en effet, absolument sûr d'avoir du même coup aboli l'olfaction?

Le premier doute était assez facile à éclaircir, deux des animaux opérés ayant auparavant fourni un assez grand nombre de tracés et m'ayant ainsi donné pour ainsi dire la mesure de leur sensibilité à l'état normal : je pouvais comparer l'intensité des troubles cardiaques et respiratoires après l'ablation des lobes olfactifs à leur intensité première. Cette comparaison faite, il m'est resté l'opinion que, s'il *y avait peu de différence entre les troubles cardiaques avant et après l'opération, il y en avait au contraire une très-notable entre les phénomènes provoqués du côté de la respiration dans l'un et l'autre cas.* Nous avons vu, en effet (fig. 111 et 112), que sous l'influence de l'excitation brusque des narines avec le chloroforme, l'ammoniaque, l'acide acétique, la respiration s'arrête *complétement* pour un temps plus ou moins long : au contraire, j'ai remarqué que quand les lobes olfactifs étaient enlevés, la respiration persistait, très-atténuée, sans doute, très-légère et superficielle, mais enfin continuait à s'exercer encore (fig. 113).

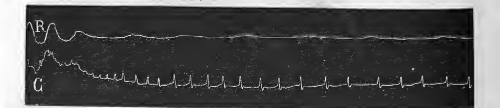


Fig. 113.—Respiration (ligne RT) par la canule trachéale et pulsations du cœur (ligne C).—Les lobes olfactifs ont été enlevés la veille : le même animal a donné à l'état normal les tracés de la figure 112. — Au point E, on excite les narines avec le chloroforme. (Héliogravure.)

Il semble donc que la fonction sur laquelle la volonté de l'animal peut s'exercer, la respiration, soit beaucoup moins troublée que la fonction cardiaque qui en est indépendante, et qu'en réalité l'animal, ayant ressenti une impression moindre, a réagi avec une moindre intensité; il me paraît dès lors qu'il serait plus juste de dire, dans les cas qui nous

occupent : *le cœur s'arrête, et l'animal suspend sa respiration*, ce qui implique l'intervention de la volonté du sujet dans l'une des deux perturbations observées.

Je n'insisterai pas, et n'entrerai dans aucun détail sur le rôle que l'on pourrait être tenté d'attribuer, d'après les remarques précédentes, au nerf olfactif, comme plus particulièrement en rapport avec la surveillance que doit exercer l'animal sur les qualités des gaz ou vapeurs qui peuvent être offensives pour ses voies respiratoires, etc.,la respiration étant suspendue pour une même impression quand les lobes olfactifs sont conservés, l'animal continuant à respirer quand ils sont absents. Ce sont là des questions tout à fait en dehors de l'ordre de ces recherches.

Mais il faut accorder maintenant quelque attention à la seconde réserve qui semble devoir être apportée à la valeur des expériences dans lesquelles on enlève les lobes olfactifs pour abolir en même temps l'olfaction.

On a beaucoup écrit contre l'opinion émise par Magendie que le trijumeau pouvait entrer pour une certaine part dans l'exercice de l'olfaction, et, malgré l'appui que paraissaient donner aux idées de Magendie les expériences du professeur Bernard, ainsi que les observations qu'il cite dans l'exposé de ses recherches, il est resté classique d'exclure le trijumeau de toute participation à la fonction de l'odorat.

Il y a cependant un rapprochement fort intéressant fait par M. Bernard (1) entre le nerf naso-palatin et le nerf lingual :

« Examinant chez le chien le nerf naso-palatin qui va à la « membrane muqueuse du nez, nous avons été très-surpris « de le trouver en apparence complétement insensible.

« Cette insensibilité d'un rameau appartenant à la 5e paire « porterait à penser qu'elle renferme des filets de sensibilité « spéciale, Magendie ayant prouvé que les nerfs de sensations « spéciales sont complétement insensibles aux irritations mé- « caniques. »

C'était donc une question à réserver dans nos expériences d'ablation des lobes olfactifs que celle de la destruction réelle de l'olfaction, et, d'après les résultats obtenus, je n'étais pas

(1) Cl. Bernard, *Syst. nerv.*, II, p. 95.

en mesure d'avancer qu'en continuant les excitations de la muqueuse nasale avec des substances odorantes en même temps que fortement irritantes, j'éliminais complétement l'intervention de l'olfaction, et ne provoquais les troubles cardiaques et respiratoires qu'en agissant sur la sensibilité générale.

Dans le but de rechercher, d'après les données du professeur Bernard (1), le rôle probable de ce nerf naso-palatin dans l'olfaction, j'avais commencé quelques expériences sur le chien : le temps m'a manqué pour les poursuivre, aussi ne m'appuierai-je point ici sur des recherches incomplètes pour émettre une opinion ; je conserve seulement le doute d'avoir complétement détruit l'olfaction chez les animaux auxquels j'ai enlevé les lobes olfactifs.

Mais, quelque part que l'on puisse accorder au trijumeau dans l'exercice de l'olfaction, il n'en est pas moins certain que les excitations de la muqueuse nasale avec les liquides volatils et irritants portent au moins autant sur les filets si sensibles que le trijumeau fournit aux narines proprement dites.

La preuve en est facile à donner, en éliminant absolument pour produire l'impression les liquides odorants et en ne conservant que les liquides irritants.

C'est dans ce but que j'avais essayé les solutions alcalines caustiques, comme la potasse et la soude, et les acides concentrés, spécialement l'acide sulfurique.

Mais chacun de ces caustiques a le défaut absolument grave pour nos recherches de ne point agir assez brusquement et de détruire les appareils nerveux sensitifs, pour ainsi dire à mesure qu'il les impressionne ; il manque ici la soudaineté de l'excitation, condition très-importante, comme nous le verrons par les observations de syncope chez l'homme, et d'autre part la persistance de cette excitation.

Mais, si les expériences avec les acides ne m'ont pas donné de résultat positif, elles m'ont appris du moins que la *brusquerie de l'impression* est l'une des conditions requises pour produire l'arrêt du cœur chez les auimaux.

Il était facile de vérifier le fait avec des excitations douloureuses d'un tout autre genre, et j'ai remplacé dans ce but le

(1) Cl. Bernard, *Syst. nerv.*, p. 236, I. Plan d'expériences.

chloroforme, l'ammoniaque, etc. par des applications rapides de pointes d'aiguilles fortement chauffées sur le rebord des narines, ou par l'excitation avec une ou deux fortes décharges d'induction.

La substitution de ces derniers agents excitants aux moyens que j'avais employés au début me permettait d'éliminer l'intervention de l'olfaction comme point de départ des phénomènes cardiaques et respiratoires ; j'avais aussi, de cette façon, des irritations intenses et soudaines. Voici ce que j'ai obtenu :



Fig. 114. Tracé 1. C. — Pulsations cardiaques et respiration. En B, brûlure rapide de la narine avec une aiguille rougie. — Arrêt respiratoire, ralentissement du cœur.
Tracé 2. — C. Pulsations cardiaques. S, signal électrique : au point D excitation induite très-forte (étincelle de 0,001) ; intermittence complète.

On voit que l'excitation très-violente, aussi soudaine que possible, de la narine avec une décharge d'induction unique (bobine Ruhmkorff, 6 éléments Bunsen) a provoqué un brusque arrêt respiratoire, et cette fois-ci une pause complète du cœur (1). Mais cet arrêt a été très-passager au lieu d'être prolongé comme dans les expériences avec le chloroforme, l'ammoniaque, etc.

La même figure 114 (tracé 1) nous montre un ralentissement très-notable du cœur qui se prolonge plusieurs secondes : ce résultat se rapproche davantage de ceux que nous obtenions

(1) Je note en passant que l'excitation induite a été *unique* et a suffi cependant pour provoquer un arrêt complet du cœur. Or, nous n'avons pas obtenu, avec de Tarchanoff, l'arrêt même passager du cœur en appliquant la même excitation *simple* au pneumogastrique.

Il faut donc admettre, ou bien qu'en raison de sa grande intensité l'excitation que j'ai employée représentait une série d'excitations ordinaires, ou bien, ce qui me paraît plus conforme aux faits que j'ai constatés avec de Tarchanoff, que cette excitation unique à l'extrémité du nerf sensible se multiplie pour ainsi dire dans le centre qui la reçoit et la réfléchit.

avec les liquides volatils, or il est produit par une brûlure avec une aiguille rougie.

Le sens des phénomènes est toujours le même, c'est toujours l'arrêt ou le ralentissement du cœur avec arrêt respiratoire; mais les différences paraissent liées à des conditions qu'il était intéressant de chercher à déterminer.

Dans l'excitation avec les liquides irritants et volatils, l'impression porte sur une *surface* évidemment considérable : la muqueuse nasale tout entière (sans parler de l'extension possible au pharynx et au larynx) peut être irritée par les vapeurs. Au contraire, dans l'excitation avec la pointe d'aiguille rougie, la *surface* impressionnée douloureusement est restreinte; dans l'excitation induite, les deux pôles étant très-rapprochés, on peut aussi considérer comme très-étroite la zone fortement impressionnée, quoiqu'on doive tenir un certain compte des cercles de diffusion. Nous voyons l'effet cardiaque et respiratoire proportionné en quelque sorte à l'étendue de la surface impressionnée, comme si l'irritation simultanée d'un plus grand nombre d'appareils sensitifs terminaux était capable de produire un effet plus intense : la *question de surface* peut donc entrer en ligne de compte, mais il faut rester dans des conditions d'excitations *comparables*, et ne point assimiler les impressions produites par la brûlure ou par les secousses d'induction, à celles que déterminent le chloroforme, l'ammoniaque, etc.

Restent à envisager la *soudaineté*, l'*intensité* et la *persistance* de l'impression.

Avec une impression brusque, l'effet est très-passager quoique très-nettement indiqué; le tracé 2 de la figure 114 en est la preuve. Après une seule excitation induite, très-brève, le cœur ne s'arrête qu'un temps très-court, une pulsation manque.

Avec une impression plus persistante, celle d'une brûlure, on voit (fig. 114, tracé 1) que l'effet cardiaque est plus prolongé.

Enfin, avec une impression durable, comme celle qui résulte nécessairement de l'introduction dans les fosses nasales des vapeurs irritantes de l'ammoniaque, du chloroforme (fig. 111, etc.), le ralentissement du cœur se prolonge considérablement comme se prolonge aussi l'arrêt respiratoire.

Toutes ces considérations sont applicables d'une manière générale, à une même série d'animaux d'une sensibilité comparable, et dans des conditions d'intensité de l'impression, aussi rapprochées que possible.

L'*intensité* de l'impression constitue, je crois, l'élément fondamental dans toutes les recherches relatives à l'influence des nerfs sensibles sur le cœur. Nous verrons bientôt que l'irritation de certains nerfs est plus active que celle des autres, sans doute parce que ces nerfs sont eux-mêmes plus sensibles ; le trijumeau par exemple, est évidemment plus sensible que l'auriculaire du plexus cervical, que le crural, etc., mais tel animal est aussi plus sensible que tel autre, dans une même série, et à plus forte raison dans des séries différentes, ce qui a fait si justement dire à Cl. Bernard que les « perturbations sont d'autant plus funestes à un animal qu'il appartient à un ordre plus élevé (1) ».

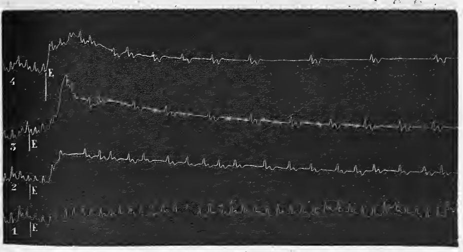


Fig. 115. — Rapport entre l'intensité croissante de l'impression et l'intensité des troubles cardiaques et respiratoires. — L'impression produite en E est graduellement augmentée de 1, 2, 3 à 4.

Mais en opérant sur le trijumeau d'un même animal, en employant à intervalles suffisants le même moyen d'excitation, on peut très-nettement obtenir une graduation progressive des effets, en augmentant graduellement l'intensité de l'excitation. (fig. 115.)

La figure 115 est formée de 4 tracés, pris dans une série

(1) Cl. Bernard, *Subst. toxiques et méd.*, p. 227 et suiv.

d'expériences chez le même animal : la graduation de l'impression ne peut évidemment pas être rigoureuse dans ses valeurs successives, mais j'ai obtenu le minimum 1 en passant l'éponge d'acide acétique *à distance* des narines, un degré plus marqué en rapprochant l'éponge dans une autre expérience, 2, un effet plus accusé en touchant légèrement les narines, 3, enfin des troubles beaucoup plus considérables et plus prolongés en appliquant un peu fortement la même éponge sur le nez de l'animal, 4.

Ces phénomènes réactionnels peuvent être rapprochés des effets que l'on produit en excitant les pneumogastriques avec des courants induits de plus en plus forts ou de plus en plus rapidement interrompus. On n'obtient d'abord avec les excitations minima qu'un léger ralentissement comparable à celui du tracé 1 (fig. 115), et l'on passe successivement par des phases analogues à celles que l'on retrouve dans les tracés 2, 3, 4 de la même figure, pour arriver enfin à l'arrêt complet.

La même comparaison serait également juste si on voulait considérer l'augmentation parallèle de l'amplitude des secousses musculaires et de l'intensité des excitations induites que l'on applique au nerf moteur.

Chacun sait avec quelle déplorable facilité l'arrêt du cœur ou syncope se produit chez l'homme profondément débilité par la souffrance, sous l'influence d'une cause qui serait insuffisante à troubler la fonction cardiaque dans les conditions normales. Les animaux peuvent aussi être placés artificiellement dans des conditions de réceptivité exceptionnelles : l'inanition, par exemple, les rend particulièrement accessibles aux influences extérieures. Chossat, dans ses recherches sur l'inanition, en donne un exemple saisissant que j'emprunte au professeur Cl. Bernard avec la réflexion qu'y ajoute celui-ci (1) :

« ... A une époque avancée de l'abstinence totale d'aliments, la moindre excitation douloureuse suffit pour déterminer immédiatement la mort.

« Une tourterelle, privée de nourriture pendant plusieurs

(1) Cl. Bernard, *Pathol. Exp.*, p. 120.

jours, tombe et meurt immédiatement quand, par exemple, on lui pince les pattes.

« ... Chossat attribue la mort à une syncope, et nos propres expériences tendent à confirmer cette opinion.

« En effet, les *mouvements du cœur*, comme nous l'avons dit ailleurs, *sont arrêtés momentanément, lorsqu'un nerf sensitif se trouve douloureusement impressionné.*

« Il serait donc possible que, chez des animaux considérablement affaiblis, *la douleur fût suffisante pour arrêter définitivement le cœur et amener la mort.* »

Il faut donc tenir un très-grand compte de la susceptibilité des sujets, je dirais plus volontiers de la susceptibilité de leur cœur, dans ces considérations sur le rapport qui existe entre l'intensité d'une impression douloureuse et les troubles cardiaques qu'entraîne cette impression ; et cette susceptibilité est elle-même dans la nature des animaux sur lesquels on pratique des expériences ou des malades soumis à des opérations ; elle peut être exagérée par certaines conditions accidentelles, et chez l'homme les souffrances, les pertes de sang, une abstinence prolongée, jointes à l'appréhension d'une opération, ont, sans nul doute, une influence très-notable sur l'exagération de cette susceptibilité (1).

(1) Les chirurgiens redoutent, et avec raison, les opérations douloureuses chez les sujets affaiblis ou chez ceux dont ils ont reconnu l'extrême sensibilité : l'événement n'a que trop souvent justifié ces craintes, et je crois très-fondée l'opinion des auteurs qui, comme M. Maurice Perrin, ont attribué à la syncope par excitation douloureuse un certain nombre de morts pendant l'anesthésie chloroformique *insuffisante* (a). Les expériences dont j'aurai bientôt à exposer les résultats et dans lesquelles j'interrogeais la sensibilité des animaux aux différentes périodes de l'administration du chloroforme, m'ont laissé cette conviction que le cœur s'arrête plus longtemps pendant la période dite d'excitation, et que le danger de mort non point *par* le chloroforme, mais *sous* le chloroforme, est plus grand à ce moment qu'en l'absence de toute tentative anesthésique. Il me semble que beaucoup de faits malheureux relevés à la charge du chloroforme doivent au contraire être mis sur le compte d'une anesthésie insuffisante : de ce nombre sont particulièrement les cas de mort par avulsion d'une dent. On redoute le chloroforme, et on accepte volontiers l'idée que, pour une opération d'aussi courte durée, point n'est besoin d'un sommeil anesthésique profond. Le patient est opéré *assis*, disposé par suite à l'anémie cérébrale, et au moment de l'avulsion de la dent, sa pâleur avertit du danger.

(a) M. Perrin, *Traité des anesthésiques*, 1864. — Art. ANESTHÉSIE *Dict. encyclop. des Sc. médic.* — Congrès de Bruxelles, Septembre 1875.

§ II. — Excitation des nerfs laryngés.

Le spasme respiratoire, provoqué par l'introduction de substances étrangères dans la partie supérieure du larynx, est un fait bien connu, et l'extrême sensibilité du nerf laryngé supérieur qui se distribue à la muqueuse de la portion sus-glottique a été maintes fois constatée (1).

On a été frappé, au contraire, de la tolérance des régions sous-glottiques du larynx et de la muqueuse trachéale innervées par le laryngé récurrent.

Pour déterminer, dans mes expériences, la différence des effets produits par l'excitation isolée de chacun de ces départements nerveux, j'ai trachéotomisé les animaux à la partie inférieure du cou et préparé soigneusement les nerfs laryngés supérieurs

La syncope peut être passagère, mais malheureusement, l'arrêt du cœur sous le chloroforme est presque toujours, comme l'a noté Billroth, un arrêt définitif.

(1) L'intensité des effets produits sur la respiration par l'excitation des régions innervées soit par le laryngé supérieur, soit par les filets pharyngiens du nerf pneumogastrique a été rappelée par Trousseau dans sa belle leçon sur l'asthme (*a*). Traitant des asthmatiques par l'attouchement du pharynx avec un pinceau chargé d'ammoniaque en solution concentrée (procédé qui avait valu à son auteur, Ducros (de Sixt) une certaine notoriété à cause d'un succès chez Madame Adélaïde d'Orléans, sœur de Louis-Philippe), Trousseau provoqua des accès d'orthopnée épouvantables.

Cl. Bernard dit au même sujet (*b*) : « Comme il arrive toujours pour les nerfs sensitifs, ces irritations se propagent par actions réflexes ; elles réagissent sur le cœur et les mouvements respiratoires, et il en peut résulter des accidents mortels tout à fait analogues à ceux qui se produisent quelquefois pendant l'anesthésie par le chloroforme. » M. Bernard rappelle aussi les tentatives de Ducros (*c*) : « Avec de l'ammoniaque introduite à l'aide d'un pinceau dans l'arrière gorge, Ducros produisait des phénomènes analogues à ceux que nous venous de décrire et qui allaient quelquefois jusqu'à la syncope. »

Je ne sais si ces accidents sont réellement dus à l'irritation des plexus pharyngiens; en effet, dans la série d'expériences exécutées sur ce sujet, j'ai vu qu'en renversant le larynx en avant, et en portant le pinceau d'ammoniaque sur le fond du pharynx, je ne déterminais les troubles respiratoires et cardiaques ordinaires que quand j'effleurais l'épiglotte ou la muqueuse sus-glottique : en préservant ces parties, l'attouchement du pharynx lui-même ne m'a paru produire aucun effet de ce genre.

(*a*) Trousseau, *Clin. méd.*, t. II, p. 471. Edition 1863.

(*b*) Cl. Bernard, *Anesthésiques*, p. 96.

(*c*) Ducros, *Compte rend. Acad. Sc.* 1842, t. XV, p. 598.

sous chacun desquels a été glissé un fil. Le larynx étant ensuite ouvert sur la ligne médiane, la trachée fendue jusqu'au niveau de la canule, j'avais sous les yeux une grande surface muqueuse sur laquelle il était facile de localiser l'excitation en touchant un point précis avec l'extrémité d'un pinceau trempé dans l'ammoniaque.

A. *Muqueuse de la portion sus-glottique du larynx.*

Quand on touche avec la solution concentrée d'alcali un point quelconque de la muqueuse *sus-glottique*, l'animal fait un brusque mouvement d'inspiration et arrête ensuite, pour un temps variable, sa respiration en expiration. Le cœur se ralentit en même temps au point de ne plus donner, pendant une minute environ, qu'un battement par seconde au lieu des 3 ou 4 battements normaux.

Il suffira de comparer la figure suivante (fig. 116), aux graphiques du cœur et de la respiration présentés dans le chapitre précédent, pour constater l'identité des effets produits par la même excitation portée sur les branches nasales du *trijumeau* et sur les filets sus-glottiques du nerf *laryngé supérieur*.

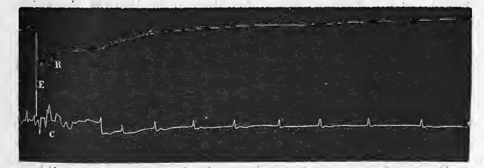


Fig. 116. — Double effet respiratoire et cardiaque produit par l'excitation de la muqueuse sus-glottique, avec un pinceau chargé d'ammoniaque.— C, pulsations du cœur,— R, Respiration trachéale. — E, instant de l'attouchement de la muqueuse sus-glottique.

En notant moi-même l'identité des troubles respiratoires et cardiaques provoqués par ces deux ordres d'excitations, je me suis demandé si les vapeurs de chloroforme, d'ammoniaque, d'acide acétique, n'étaient pas transportées, lors de l'attouchement des narines, jusqu'à l'orifice supérieur du larynx, et si

je n'avais pas précisément observé les effets de l'excitation des laryngés supérieurs, croyant avoir affaire à l'excitation des branches nasales du trijumeau.

Il était facile de vérifier le fait, d'abord en constatant que la section des deux nerfs laryngés supérieurs supprime l'effet de l'excitation portée directement ou indirectement sur la muqueuse de la portion sus-glottique, puis en répétant, après cette élimination de la sensibilité laryngée, l'excitation des narines.

Or, après la section des deux laryngés supérieurs, l'application du pinceau chargé d'ammoniaque, qui tout à l'heure provoquait des troubles respiratoires et cardiaques si manifestes, reste sans effet aucun sur le cœur et ne détermine plus qu'une légère suspension de la respiration. Reprenant ensuite l'application de l'éponge chargée de chloroforme ou d'ammoniaque sur les narines du même animal chez lequel était supprimée la sensibilité de la portion sus-glottique de la muqueuse, j'ai retrouvé les mêmes troubles respiratoires et cardiaques qu'auparavant.

La figure 111 a été précisément obtenue dans ces conditions, et je l'ai choisie à dessein pour démontrer l'action indépendante des excitations du trijumeau.

Il ressort évidemment de cette double expérience que dans le mécanisme des arrêts respiratoires et cardiaques, *des voies différentes conduisent aux mêmes centres les impressions périphériques, agissent de la même façon sur ces centres et que la suppression de l'une de ces voies centripètes ne modifie en rien la transmission par les autres, pas plus que la mise en jeu des centres recepteurs* (1).

B. *Troncs des nerfs laryngés supérieurs.*

Il est un fait constant pour les excitations des nerfs sensibles, c'est que l'impression produite sur leurs terminaisons cutanées

(1) Il faut faire une remarque relative à la conservation *partielle* de l'effet respiratoire malgré la section des laryngés supérieurs. Cette section ne supprime point en effet les anastomoses intra-laryngées des filets terminaux du laryngé supérieur avec le récurrent, par l'anastomose dite de Galien: d'après Philippeaux et Vulpian ces filets anastomotiques viendraient tous du laryngé supérieur (méthode de Waller); dès lors, l'impression sur la muqueuse de la portion sous-glottique peut retentir encore par cette voie détournée sur les centres respiratoires.

ou muqueuses est toujours plus active que l'excitation des troncs nerveux eux-mêmes dans leur continuité.

Cette distinction importante a été reconnue par le professeur Claude Bernard et indiquée dans les lignes suivantes (1) : « Il faut encore ajouter que la même excitation mécanique, comme un pincement par exemple, portée comparativement sur la peau, sur le tronc du nerf et sur la racine postérieure, permet de constater que l'irritation de la *terminaison* et de l'*origine* du nerf sensitif produit des effets plus énergiques que ceux qu'elle détermine en irritant le *tronc* d'un nerf mixte. »

La pratique chirurgicale démontre aussi que le temps le plus douloureux d'une opération est toujours la section de la peau.

Nous devions nous attendre tout au moins à une atténuation considérable des phénomènes cardiaques et respiratoires en transportant l'excitation des appareils terminaux laryngés aux troncs mêmes de ces nerfs.

Les deux bouts centraux des laryngés supérieurs ont été rapprochés et très-fortement excités avec de l'ammoniaque caustique : on voit dans la figure suivante (fig. 117) que le retentissement cardiaque a eu lieu, mais a présenté une intensité beaucoup moindre que quand on touchait simplement la muqueuse sus-glottique avec un pinceau trempé dans la solution modérément concentrée.



Fig. 117. — Effets cardiaques moins intenses produits par l'excitation des bouts centraux des nerfs laryngés supérieurs, que par l'excitation plus modérée de leurs terminaisons dans la muqueuse sus-glottique du larynx. (Héliogravure.)

C. *Muqueuse sous-glottique et trachéale.*

En regard de cette sensibilité exquise de la muqueuse qui tapisse l'épiglotte et la région sus-glottique du larynx, on doit rappeler la tolérance extrême de la muqueuse des régions sous-jacentes. Il existe une délimitation aussi tranchée entre

(1) Cl. Bernard, *Syst. nerv.* t. I p. 301.

la sensibilité sus et sous-glottique qu'entre l'innervation de l'une et l'autre régions. La localisation rigoureuse de l'excitation est possible quand on a soin de préserver du contact des vapeurs ammoniacales la partie supérieure de la muqueuse et d'appliquer l'extrémité du pinceau exactement en un point. Or, à partir de la face inférieure des cordes vocales jusqu'aux régions les plus basses de la muqueuse trachéale que puisse atteindre une excitation directe, on constate la disparition complète des troubles qui sont si frappants quand on remonte au-dessus du niveau des cordes vocales.

La figure 118 a été fournie par le même animal qui présentait les grands arrêts du cœur et de la respiration à la suite de l'attouchement du vestibule du larynx.

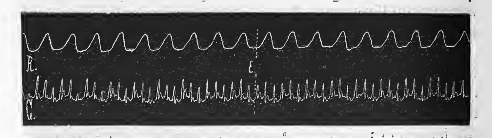


Fig. 118. — Absence complète de troubles cardiaques et respiratoires (C et R), quand on excite en E la muqueuse sous-glottique avec un pinceau chargé d'ammoniaque. (Héliogravure.)

On constate qu'il ne s'est produit absolument aucune modification des pulsations du cœur ou des mouvements respiratoires après l'application du pinceau chargé d'ammoniaque caustique sur la muqueuse sous-glottique.

Cette même tolérance de la muqueuse a été constatée pour le chloroforme en applications directes.

De plus, nous avons remarqué, le professeur Marey et moi, que l'introduction des vapeurs du chloroforme dans le poumon par une bifurcation de la canule trachéale, *à une distance suffisante des narines de l'animal*, ne provoquait aucune espèce de troubles cardiaques ou respiratoires, aucun mouvement général : le lapin, soumis aux inhalations de chloroforme par la trachée, s'endormait paisiblement.

J'ai rendu témoin de cette insensibilité relative de la muqueuse trachéale le professeur Dogiel, qui avait admis autrefois que

les désordres respiratoires et cardiaques pouvaient avoir leur point de départ dans *toute l'étendue de la muqueuse respiratoire.* Il est vraisemblable que, dans les cas observés par M. Dogiel, le chloroforme présenté à la canule trachéale était à une trop faible distance des narines, et que dès lors les arrêts constatés tenaient à une impression sur le trijumeau.

Il semble donc bien probable que les actes convulsifs, les spasmes respiratoires et les désordres cardiaques si fréquents chez l'homme et chez les animaux au début de l'administration du chloroforme tiennent, comme l'ont déjà montré MM. Cl. Bernard, P. Bert, etc., à l'irritation violente des filets sensitifs des narines, des lèvres, du larynx (portion sus-glottique) (1), tandis que tous ces troubles, quelquefois si graves, manquent complétement quand les vapeurs irritantes pénètrent directement dans les poumons *par la trachée.*

(1) Le professeur Paul Bert exprime ainsi les conclusions de ses recherches : « Il n'existe point, dans l'intoxication anesthésique, de véritable période d'excitation ; l'irritation due au contact du chloroforme avec les muqueuses est la cause principale de l'agitation manifestée par les animaux soumis à son inhalation (*a*). »

Cl. Bernard (*b*) : « Cette nécessité d'administrer les agents anesthésiques par le poumon est regrettable : le chloroforme irrite la membrane muqueuse du pharynx et les nerfs sensitifs très-délicats qui se distribuent dans ces parties; il en résulte des mouvements convulsifs et des phénomènes d'asphyxie, souvent une suffocation, quelquefois la mort. »

A propos des inhalations trachéales (*c*) : « Si ce procédé n'exigeait pas une trachéotomie, ce serait assurément le meilleur de tous à employer. »

Ce sont là des considérations d'une haute gravité au point de vue de l'administration des anesthésiques chez l'homme ; je comprends que les chirurgiens qui ont eu à déplorer des accidents au début de l'administration du chloroforme, se soient enthousiasmés pour les injections intra-veineuses de chloral qui du moins ne présentent point ces terribles surprises. Mais jusqu'à ce que le chloral ait fait ses preuves, et sans me permettre d'en juger en aucune façon l'opportunité, je rappelle les lignes suivantes du professeur Bernard (*d*) : « Quand on administre le chloroforme ou l'éther en débutant par une forte dose, il se produit une action irritante très-vive sur l'entrée des voies respiratoires, qui provoque des contractions spasmodiques parfois très-violentes, et une suspension de l'acte respiratoire..... Lorsqu'on donne le chloroforme lentement, les choses ne se passent plus de même. » Ces paroles sont à méditer, et peuvent donner à réfléchir à ceux qui croient qu'on doit *sidérer* les patients au lieu de les anesthésier progressivement.

(*a*) P. Bert. Comptes rendus Acad. sc. 1867. T. LXIV. — *Journal de l'Anat. et de la Phys.*, 1867 p. 336.

(*b*) Cl. Bernard. — *Anesthésiques*, p. 148.

(*c*) *id.* *id.* — *Anesth.*, p. 95 et suiv.

(*d* (*Ibid.*)

III. Excitations des nerfs rachidiens (1).

A. *Nerfs auriculaires.*

L'oreille reçoit ses nerfs sensibles du trijumeau et des nerfs cervicaux.

J'ai cherché à exciter, par le pincement des diverses régions du pavillon de l'oreille, telle ou telle branche spécialement ; mais, malgré le soin que l'on peut prendre de localiser l'impression dans la zone innervée par un rameau déterminé, on doit toujours se souvenir que les différents nerfs sensibles forment des réseaux périphériques dans lesquels ils sont associés, comme le prouvent les suppléances nerveuses qui s'établissent après la résection de l'un des troncs sensitifs ; dès lors, il m'a paru difficile d'irriter à coup sûr des filets nerveux d'une provenance déterminée, en soumettant le pavillon de l'oreille à un pincement énergique, et j'ai cru plus simple d'exciter isolément chacun des nerfs de cette région.

Comme il était facile de le prévoir, en irritant le tronc de tel ou tel nerf, j'ai obtenu des effets cardiaques moins intenses qu'en excitant les terminaisons cutanées du même nerf. Nous avons vu, en effet, que le nerf sensible est plus excitable à sa périphérie que dans sa continuité.

Cependant, tout atténués qu'ils soient, les effets sont très-nets, et la figure suivante montre que le cœur subit un ralentissement encore très-notable quand on pince le nerf grand auriculaire du plexus cervical (fig. 119).

L'excitation de la racine postérieure de la deuxième paire

(1) J'omets à dessein, dans cette partie de mon travail, les effets *cardiaques* produits par l'excitation du filet nerveux que MM. Ludwig et Cyon ont nommé « nerf dépresseur. » Je compte étudier spécialement ce sujet dans un prochain mémoire.

Je dirai seulement que j'ai répété un grand nombre de fois l'excitation du bout central de ce nerf et dans les conditions les plus variées : il m'a toujours paru évident que son excitation provoquait *le ralentissement du cœur comme toutes les excitations des nerfs sensibles*, sans qu'il fut besoin d'invoquer l'interprétation de MM. Ludwig et Cyon et de subordonner le ralentissement du cœur à l'abaissement de la pression artérielle.

cervicale, accessible sans un traumatisme considérable, m'a donné chez le chien un résultat tout à fait comparable : ralentissement ou arrêt du cœur (suivant l'intensité de l'excitation), et arrêt momentané de la respiration.



Fig. 119. Ralentissement du cœur et arrêt respiratoire produits par le pincement du nerf auriculaire postérieur au point E. (Héliogravure.)

J'ai renouvelé ces expériences sur les troncs ou branches des autres nerfs sensibles rachidiens qui peuvent être atteints sans vivisection grave, sur les racines postérieures des nerfs lombaires, etc. Je me contente de présenter ici deux tracés, l'un (fig. 120), montrant l'effet d'une excitation légère



Fig. 120. Ralentissement du cœur et léger arrêt respiratoire produits par l'attouchement du sciatique superficiel. (Le nerf n'a été qu'effleuré pour éviter les mouvements généraux qui eussent troublé le tracé.) (Héliogravure.

du petit sciatique, l'autre celui d'une double excitation induite du tronc même du grand nerf sciatique (fig. 121).

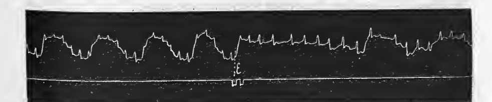


Fig. 121. Ralentissement du cœur et arrêt de la respiration consécutifs à l'excitation du bout central du grand sciatique par deux faibles secousses d'induction. (Ruptures seules, indiquées sur la ligne du signal électrique.) (Héliogravure.)

Les effets cardiaques dus à l'excitation douloureuse des racines postérieures des nerfs rachidiens, ont été étudiés par

le professeur Cl. Bernard avec une telle autorité que le mieux était de rassembler tous ses résultats et de les résumer sous forme de propositions. J'ai fait ce travail en transposant sur des feuilles divisées, dans lesquelles les pressions se comptaient sur les ordonnées et le temps sur une abscisse commune, toutes les courbes correspondant aux chiffres des nombreuses expériences du professeur Bernard. Ces courbes ont été ensuite rapprochées les unes des autres, superposées (en tenant compte seulement du sens des phénomènes) et réduites enfin à un schéma que je reproduis figure 122 : les idées que

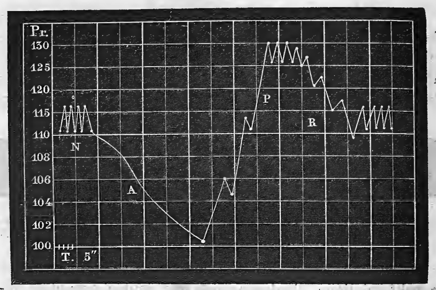


Fig. 122 — Schéma représentant les variations de la fonction cardiaque sous l'influence des excitations des racines postérieures rachidiennes (Chien).
Pr. Pression carotidienne. T, temps divisé par secondes.
N. Normal. — A, pincement d'une racine postérieure, arrêt du cœur.
P. 20 secondes après le pincement. — R. retour à l'état normal.

représente cette courbe schématique sont appuyées de quelques citations (1) et de l'approbation du professeur Bernard auquel j'ai soumis ce passage.

(1) Cl. Bernard (*Syst. nerv.* T. I, p. 291) « Au moment même où l'on pinçait la racine postérieure, il y avait *immobilité de la colonne mercurielle et cessation des pulsations*; on aurait dit que le cœur était arrêté, ce qui amenait toujours un abaissement brusque de la colonne mercurielle, auquel succédait ensuite une élévation.

P. 295. « Vous voyez maintenant qu'en touchant à peine les racines antérieures (*il s'agit ici de la sensibilité récurrente*) ou postérieures,

On voit (fig. 122) l'abaissement de la ligne des pressions s'opérer *sans oscillations ce qui indique l'arrêt du cœur.*

C'est là le fait essentiel pour nous en ce moment; les autres phénomènes seront repris quand nous étudierons la pression artérielle au même point de vue spécial où nous sommes placés maintenant pour les variations de la fonction cardiaque.

§ IV. Excitations des nerfs sensibles viscéraux.

Nous n'avons étudié jusqu'ici que les troubles cardiaques et respiratoires provoqués par l'excitation des nerfs sensibles appartenant au *système cérébro-spinal.*

Mais quand on parcourt les recueils d'observations où sont notées des morts par syncope sous l'influence d'excitations ayant leur point de départ dans les *nerfs viscéraux*, on est engagé à

on détermine des mouvements d'arrêt momentanés, suivis d'oscillations en tout semblables à celles que nous avons décrites précédemment » (chien).

p. 270. Après avoir rappelé ses recherches avec Magendie, le professeur Bernard signale les effets produits par l'excitation de la racine antérieure, la racine postérieure correspondante étant intacte : « on pinça la racine antérieure et *constamment* on observa un *brusque arrêt* des pulsations, arrêt qui durait très-peu de temps.

« On coupa alors la racine antérieure sans rien produire du côté du cœur. Mais le pincement de son bout périphérique déterminait un *arrêt brusque* du cœur suivi d'accélération de ses battements. (chien).

« Dans des expériences faites sur d'autres chiens, cet arrêt du cardiomètre survenait sous l'influence de sensations assez peu vives pour ne pas faire crier l'animal. »

p. 273. « Quand on touchait très-légèrement la racine postérieure..... il y avait un arrêt brusque de la colonne mercurielle à 70 millimètres et presque aussitôt un abaissement de 5 à 10 millimètres. » (chien).

p. 286. « Toutes les fois qu'on produisait une douleur en pinçant soit un nerf sensible, soit la peau de l'oreille, il y avait un abaissement subit de la colonne mercurielle tombant de 100 millimètres à 75, *comme si cette douleur suspendait momentanément l'action du cœur.* » (lapin).

Je tenais seulement à justifier le schéma que j'ai présenté comme correspondant aux résultats expérimentaux du professeur Bernard ; on trouvera dans ses œuvres (*Syst. nerv. et subst. toxiques*) beaucoup d'autres exemples dont la lecture attentive entrainera cette conviction : que les exceptions tiennent à des conditions particulières et non aux variations d'un phénomène qui doit se retrouver constamment quand on se place dans des conditions identiques, vérité si souvent et si justement invoquée par M. Bernard.

demander aux expériences la raison de ces morts subites ou rapides chez l'homme.

Les expériences sur les animaux *à sang chaud* n'ont point fourni, jusqu'à présent, de renseignements bien nets sur cette question (1).

(1) Les notes suivantes pourraient être interprétées comme des résultats positifs et considérées comme démontrant que certaines lésions viscérales peuvent déterminer la mort rapide, chez les animaux *à sang chaud*, par un mécanisme analogue à celui que l'on suppose exister chez l'homme.

Le professeur Bernard dit : (*Syst. nerv.* II, p. 520) : « Les ganglions solaires sont sensibles aux fortes contusions et au tiraillement ; l'excitation des nerfs qui en partent détermine des mouvements dans les membres ; *l'ablation de ces ganglions* produit une péritonite particulière *avec dilatation énorme des vaisseaux capillaires*.

Cette remarque, le fait d'une accumulation considérable de sang dans les vaisseaux de la cavité abdominale, pourrait expliquer la mort. J'ai observé des syncopes successives chez une femme à laquelle je pratiquais une ponction pour une ascite : chaque fois qu'une certaine quantité de liquide s'écoulait par la canule de fort calibre, le cœur faiblissait, la syncope plus ou moins complète se produisait. Je citerai, au même point de vue, une opération d'ovariotomie à laquelle j'assistais comme aide : l'opérée mourut de syncope dès qu'on eut soulevé l'énorme kyste qui entravait la circulation abdominale. Le terme de *choc* dont s'est servi le Dr L. Lande dans l'observation qu'il a publiée (*Gazette méd. de Bordeaux*, septembre 1873), répondait à l'interprétation présentée ici.

Beaucoup d'autres faits de ce genre sont faciles à réunir, particulièrement à propos des accouchements brusques : Nægelé et Grenser disent à ce sujet (*Accouchements*, p. 596) que les lipothymies et syncopes après l'accouchement, surtout quand il est terminé trop brusquement, ont pour cause la déplétion subite de la matrice ; le sang faisant irruption dans les vaisseaux des cavités abdominale et pelvienne dégagées de toute pression, est soustrait en trop grande quantité au cerveau et au cœur. »

Tous les physiologistes savent, du reste, que l'accumulation du sang dans les vaisseaux abdominaux produite par la section des splanchniques (Ludwig, Asp), par la ligature de la veine porte (Oré), peut-être aussi par l'excitation du nerf dépresseur (Ludwig et Cyon), met les animaux dans les mêmes conditions qu'une hémorrhagie abondante ; ils ont en effet une véritable hémorrhagie dans les vaisseaux abdominaux.

Je crois que la mort, dans ces conditions toutes mécaniques, est facile à reproduire chez les animaux ; ils meurent alors comme ils mourraient d'une saignée artérielle.

Mais, c'est l'arrêt prolongé du cœur observé à la suite de certaines irritations des nerfs viscéraux chez l'homme que les expériences me semblent difficilement capables de reproduire d'emblée chez les animaux à *sang chaud* ; le *choc épigastrique*, la douleur si bien nommée « syncopale » des contusions *du testicule*, l'introduction d'une certaine quantité de *boissons glacées* dans l'estomac, etc., toutes ces causes auxquelles les médecins rattachent avec raison un grand nombre de syncopes et quelques morts subites, sont d'un

Au contraire, les animaux à sang froid, comme la grenouille (*R. esculenta*), semblent se prêter tout spécialement à la reproduction de phénomènes très-analogues à ceux qu'on observe chez l'homme à la suite des contusions épigastriques.

On connaît les expériences successives de Bernstein (1), Goltz (2), de Tarchanoff (3), sur l'excitation des nerfs mésentériques, de l'intestin normal, de l'intestin enflammé de la grenouille : ces différents physiologistes ont vu l'arrêt plus ou moins prolongé du cœur se produire sous l'influence des excitations électriques ou mécaniques de l'appareil nerveux mésentérique de la grenouille (4).

Les expériences de Tarchanoff sont particulièrement intéressantes en ce qu'elles démontrent que l'exaltation de la sensibilité des nerfs mésentériques, provoquée par l'exposition à l'air et l'inflammation de l'intestin, a pour effet de déterminer un arrêt beaucoup plus long du cœur.

J'ai répété, avec de Tarchanoff, ces expériences sur la grenouille, en inscrivant les mouvements du cœur avec la pince cardiaque qu'emploie le professeur Marey (5). Les percussions de l'intestin enflammé ont été opérées avec un petit marteau pendant qu'un levier enregistreur inscrivait à côté du tracé des mouvements du cœur, la durée des coups, leur nombre, etc. (6).

autre ordre que les grandes dérivations sanguines invoquées au début de cette note comme point de départ de certains arrêts du cœur.

Ce sont ces causes, efficaces chez l'homme, que nous retrouvons inefficaces chez les animaux à *sang chaud*, dont les nerfs viscéraux ont leurs *propriétés physiologiques*, c'est-à-dire ne font point partie d'un *tissu enflammé*.

(1) Bernstein (*Centralblatt*, 1863, p. 817 et *Arch. f. Anat. u. Phys.*, 1864, p. 614.

(2) Goltz (*Virchow's Archiv*. XXVI, t. II et XXIX, p. 394.

(3) De Tarchanoff (*Archives de Physiologie*. — Paris 1875, p. 498.

(4) L'arrêt du cœur observé chez la grenouille par Goltz (cité par Wundt. *Physiol.* p. 248. — Trad. Bouchard), par le prof. Vulpian (*Soc. Biol.* 1863), à la suite de commotions de la colonne vertébrale, n'a pas de rapports directs avec les arrêts produits par l'excitation des nerfs périphériques : on admet qu'il s'agit dans ces cas de commotions des centres nerveux médullaires (?)

(5) Pour la description de cette pince myographique du cœur de grenouille, V. Marey. Mém. II, du présent volume. — François-Franck. Art. Myographie du *Dict. Encyclop. des Sc. méd.*

(6) Ce petit appareil est formé de deux tambours à air recevant tous les deux les oscillations d'un grand diapason de 10 vibrations doubles par seconde,

La figure 123 contient deux tracés comparatifs : le supérieur (n° 1) montre un grand arrêt du cœur (qui a duré 40 secondes) à la suite d'une série de percussions de l'intestin enflammé (ces percussions sont comptées par les vibrations S. (10 vibrations par seconde). Le tracé inférieur (n° 2) représente un arrêt du cœur de la même grenouille produit par l'excitation induite du bout périphérique du nerf pneumogastrique droit, (ligne du signal S).

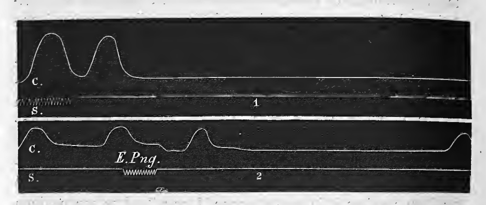


Fig. 123. — Partie supérieure 1. Arrêt du cœur (ligne C) produit par une série de percussions (S) de l'intestin enflammé de la grenouille.

Partie inférieure 2. Arrêt du cœur (C) par l'excitation du bout inférieur du pneumogastrique droit (ligne S).

Ces deux tracés ont été recueillis successivement, à quelques minutes d'intervalle. On peut s'assurer que le temps qui sépare le début de l'excitation du moment de l'arrêt est plus considérable pour l'effet de l'irritation mécanique de l'intestin que pour l'excitation induite du nerf pneumogastrique. Ce détail sera rappelé à propos du trajet suivi par les impressions périphériques pour retentir sur le cœur.

L'un de ces tambours est placé horizontalement au-dessus de l'abdomen de la grenouille, et, au lieu de levier, porte un petit marteau qui percute l'intestin à un moment donné. L'autre tambour inscrit en même temps les moments précis où commence et finit l'excitation, le nombre des percussions. Comme la plume de ce dernier est disposée sur la même ligne que la plume du myographe du cœur, on voit facilement les rapports de l'excitation avec le phénomène provoqué, et on peut compter le temps qui s'écoule avant que l'arrêt ne se produise. Ce temps varie, du reste, suivant la sensibilité de l'intestin enflammé, suivant que la grenouille a été plus ou moins fatiguée, etc. — L'intérêt consiste surtout à comparer dans un même moment l'intervalle qui sépare l'arrêt du cœur de l'irritation intestinale et l'intervalle qui s'écoule entre l'excitation directe du pneumogastrique et son effet cardiaque.

Me fondant sur cette considération, que l'arrêt du cœur s'obtient beaucoup plus sûrement et est beaucoup plus considérable quand on irrite l'intestin *enflammé* de la grenouille que quand on excite l'intestin fraîchement exposé à l'air, je repris les expériences qui ne m'avaient donné qu'un résultat négatif sur le lapin : au lieu d'exciter le péritoine ou l'estomac récemment mis à nu, j'irritai ces parties après avoir attendu 24 heures à partir du moment de l'ouverture de l'abdomen.

Le péritoine était à ce moment le siége d'une violente inflammation, et, en écartant les lèvres de la plaie abdominale, j'ai pincé la petite portion d'estomac qui se présentait. La figure 124 montre le ralentissement du cœur que produisit ce pincement fait au point P.



Fig. 124. — Ralentissement du cœur et arrêt de la respiration produits par le pincement, au point P, du péritoine enflammé. (Héliogravure.)

La percussion de la paroi abdominale, produite pour imiter le choc épigastrique chez l'homme, a été suivie de mouvements généraux tellement violents que les pulsations du cœur ne purent être recueillies, mais toutes les irritations mécaniques directes de l'intestin enflammé ont produit des troubles cardiaques au moins aussi notables que celui qui est indiqué figure 124 (1).

(1) Les injections d'eau glacée dans l'estomac tout fraîchement ouvert ou dans le péritoine enflammé n'ont point donné lieu à des troubles cardiaques appréciables.

On sait que l'ingestion d'eau très-froide a été quelquefois suivie chez l'homme de syncopes plus ou moins prolongées, dans certains cas même de mort subite. Je n'ai pu observer de phénomènes analogues, peut-être parce que les animaux en expérience ne présentaient pas les conditions de suractivité circulatoire toujours notées chez les personnes qui ont éprouvé des accidents.

(*Voy.* les théories du mode d'action des ingestions froides :
— Dreschfelds (*Rech. du Laboratoire de Wurzbourg,* 1867.)
— R. Ganz (*Pflüger's Archiv.* 1871, p. 8-13).
— Mayer et Pibram. (*Centralblatt,* 1873, p. 200).
— Oswald Naumann *Pflüger's Arch.* 1871-1872).

Ces phénomènes produits du côté du cœur par l'irritation des régions enflammées semblent bien dus à l'exagération morbide de la sensibilité que l'on sait être peu développée dans les nerfs viscéraux à l'état normal (1).

(1) Les expériences de Flourens sur la sensibilité des tendons enflammés, les recherches du professeur Bernard sur l'exagération de la sensibilité des parties congestionnées par la section du sympathique (V. *Pathol. exp.* p. 386, et *passim*), autorisent à expliquer pourquoi l'irritation de certaines régions n'est pas suivie de troubles cardiaques à l'état de santé et s'accompagne au contraire d'arrêt ou de ralentissement du cœur pendant l'inflammation.

Mais il est bon de rappeler que l'écrasement de l'un ou l'autre ganglion semi-lunaire a provoqué l'arrêt du cœur dans certaines expériences de Brown-Séquard (*Arch. de méd.*, 1856); que M. Bernard attribue la mort à l'arrêt du cœur dans des conditions qu'il rappelle ainsi : « En pratiquant diverses expériences sur les ganglions ou nerfs abdominaux, j'ai vu souvent succomber les sujets avant qu'il se fut manifesté aucun phénomène inflammatoire, ni aucune autre lésion anatomique appréciable. » (Cl. Bernard. *Path. Exp.* p. 120.

« L'injection d'une certaine quantité d'éther dans l'estomac du lapin (qui ne peut pas vomir), a été également suivie de mort subite après distension considérable de l'estomac. » (Cl. Bernard. *Subst. toxiques et méd.*, p. 416).

De son côté, M. Oswald Naumann (*Pflüger's Arch.* 1871-1872, p. 196 à 202) a provoqué l'arrêt du cœur par des excitations électriques de la muqueuse stomacale, chez des mammifères, après section de l'encéphale en avant de la moelle allongée.

Voilà des exemples, et il serait facile de les multiplier, qui prouvent que les nerfs viscéraux, spécialement ceux de l'abdomen, peuvent être le point de départ de troubles cardiaques capables d'amener la mort.

Chez l'homme, les cas de mort subite après l'ingestion d'eau glacée, le corps étant en sueur, ou bien la syncope produite par un coup sur l'épigastre, peut-être encore, comme l'a pensé le professeur Bernard, (*Syst. nerv.* T. I, p. 374), les morts subites observées quelquefois chez les enfants à la suite des convulsions dites internes, etc., ces divers accidents se rapprochent naturellement des troubles analogues constatés chez les animaux à sang froid et à sang chaud.

Je me borne à noter ici le point de départ commun : j'aurai bientôt à en discuter le mécanisme.

CHAPITRE II.

CENTRES ET VOIES DE RÉFLEXION DES EXCITATIONS PÉRIPHÉRIQUES.

Dans tous les exemples d'excitation des nerfs sensibles que nous avons analysés (1), l'arrêt ou le ralentissement des battements du cœur s'est offert à nous comme un fait constant.

Cette similitude de l'effet produit, quels que fussent les nerfs excités, devait faire supposer que les excitations des nerfs sensibles retentissent sur un centre commun, et, d'après la nature des troubles observés, c'étaient les centres bulbaires des nerfs modérateurs du cœur qui recevaient les impressions périphériques.

A. *Siége du centre réflexe dans le Bulbe.*

La vérification de cette hypothèse était facile : la section de la moelle, immédiatement *au dessous du bulbe*, démontra, en effet, que les excitations portées sur les nerfs qui aboutissent aux *centres nerveux médullaires proprement dits* restaient ensuite sans effet sur le cœur : la transmission centripète était interrompue pour eux par l'isolement des parties intra-craniennes de l'axe cérébro-spinal.

(1) Excitations des branches nasales, auriculaires du trijumeau. — Excitations des branches du plexus cervical, des racines rachidiennes, des nerfs laryngés supérieurs, des nerfs sciatique et crural, des filets abdominaux du sympathique.

Cette même expérience permettait d'établir encore que ce n'est pas par la moelle épinière que les excitations *du trijumeau* retentissent sur le cœur, puisque l'impression produite sur les narines par l'ammoniaque provoquait toujours, le bulbe étant conservé, les mêmes phénomènes cardiaques. (Fig. 125, tracé supérieur.)

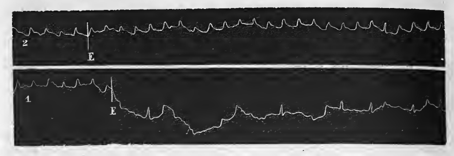


Fig. 125. — Conservation du ralentissement des battements du cœur, à la suite de l'excitation du trijumeau (E), la moelle étant coupée au dessous du bulbe (ligne 1). — Abolition des phénomènes cardiaques par la destruction du bulbe (ligne 2) : on excite en E, aucun trouble ne se produit. (Respiration artificielle.)

Comme contre-épreuve, sur d'autres animaux, j'ai fait la section *en avant du bulbe et de la protubérance*, isolant ainsi tous les centres nerveux cérébraux proprement dits. Dans ces conditions, les excitations des terminaisons périphériques des nerfs sensibles ont produit les mêmes phénomènes cardiaques (Fig. 126, ligne 2) que quand l'axe cérébro-spinal était intact : d'où cette conclusion que les centres récepteurs et de réflexion sont circonscrits dans les régions de la protubérance ou du bulbe.

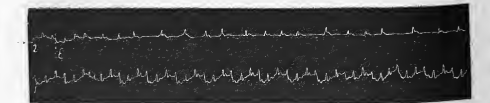


Fig. 126. — Ligne 1, cœur et respiration après l'ablation des hémisphères. (Jeune lapin de 5 semaines. Ligne 2, excitation nasale en E. Conservation du ralentissement du cœur et de l'arrêt respiratoire, après l'ablation des lobes cérébraux. (Héliogravure.)

La destruction du bulbe étant suivie de l'abolition des troubles cardiaques (fig. 125, ligne 2), on acquiert la certitude

que les centres bulbaires sont bien ceux dont l'excitation est nécessaire pour que les phénomènes réflexes cardiaques se produisent.

Tout ceci n'implique pas l'élimination des centres nerveux encéphaliques, autres que les centres bulbaires : il n'est pas douteux que des impressions d'ordre émotionnel ne puissent partir des hémisphères cérébraux (quelle que soit l'origine première de ces impressions) et retentir ensuite sur le cœur de la même façon que les excitations des nerfs périphériques (1).

Les détails qui précèdent sont destinés à montrer que *le bulbe rachidien est une station nécessaire par laquelle doivent passer, pour y être transformées en incitations centrifuges, toutes les impressions périphériques assez intenses pour amener des perturbations cardiaques.*

(1) MM. Arloing et Tripier, dans leurs intéressantes recherches sur la physiologie des nerfs pneumogastriques (*Arch. de phys.* 1871-1872, p. 593) émettent sur ce sujet une opinion complétement différente de celle que nous développons dans ce travail :

1° Ils pensent que les excitations douloureuses « produisent une systole brusque et violente, suivie d'un ralentissement plus ou moins marqué. » Les tracés qu'ils présentent semblent, en effet, démontrer que l'excitation du bout *central* d'un pneumogastrique est suivie d'une augmentation brusque de pression carotidienne correspondant à une systole plus énergique du cœur. Mais je ferai remarquer que toujours cette ascension exagérée du levier inscripteur de la pression carotidienne coïncide avec une brusque expiration ; ils n'évitent pas cette objection en disant que le tracé de la « respiration dépassait d'un millimètre au plus le niveau des expirations normales. » La courbe du pneumographe, en effet, ne donne pas la mesure de la pression intra-thoracique : elle est commandée par le mouvement de la paroi, et l'animal peut fermer sa glotte, faire effort, sans que le tracé pneumographique s'élève proportionnellement à l'effort. J'ai pu m'assurer de la réalité de cette cause d'erreur, en explorant la pression intra-trachéale en même temps que le mouvement de la paroi thoracique.

2° « En comparant, disent MM. Arloing et Tripier, ces phénomènes aux troubles circulatoires qui accompagnent une émotion vive, troubles qui *débutent, ainsi que chacun l'a ressenti, par une violente systole*...»

Ceci est-il bien démontré ? Ce qu'on a *ressenti* n'est peut-être pas ce qui est rigoureusement vrai. Si l'on mesurait l'intensité réelle d'une systole du cœur à l'intensité de la sensation que l'on perçoit en appliquant le doigt sur la radiale, on affirmerait à tort, qu'après une intermittence par exemple, le cœur fournit une systole très-énergique.

Il me semble que l'on commet la même erreur, en appréciant sur soi-même l'effet *initial* d'une émotion vive. On ne se rend pas compte du premier phénomène, la *pause* un peu plus prolongée du cœur, et quand se produit la systole, qui vient ensuite, on la trouve violente, précisément parce qu'elle succède à un repos plus grand.

B. *Trajet intra-bulbaire des impressions sensitives.*

Les nombreuses expériences des physiologistes ayant pour but de rechercher le trajet intra-médullaire des impressions sensitives ont établi que la transmission centripète était *en partie directe, en plus grande partie croisée.*

Des mêmes recherches, il résulte encore que c'est *surtout, sinon exclusivement, par la substance grise* de la moelle que s'opère cette transmission.

J'ai donc laissé de côté cette question que de sérieux travaux semblent avoir tranchée, et j'ai cherché seulement à me rendre compte du *trajet suivi par les excitations du trijumeau dans l'intérieur de la substance grise du bulbe.*

Voici, du reste, un exemple d'effet cardiaque d'une impression douloureuse dans lequel l'animal, recevant au point E l'irritation (goutte d'ammoniaque caustique sur la narine), ne fait, par hasard, aucun mouvement (fig. 127).

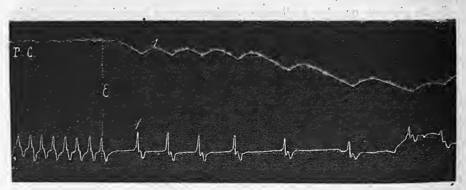


Fig. 127. — Pression carotidienne (P. C) et pulsations cardiaques (C) d'un lapin. Au point E on excite les narines en y projetant une goutte d'ammoniaque caustique. Aussitôt une pause du cœur se produit et en même temps la pression carotidienne s'abaisse.

Si le doigt eût été appliqué sur la région du cœur, il est très-probable que l'intermittence qui suit le moment E de l'impression aurait passé inaperçue et qu'on aurait trouvé très-énergique la pulsation 1 (ligne C), tout comme si l'on avait saisi la carotide entre les doigts et qu'on eût été fortement impressionné par l'élévation de pression 1 sans tenir compte de l'abaissement préalable.

MM. Arloing et Tripier ont parfaitement expliqué, d'après Marey, l'erreur des physiologistes au sujet de l'appréciation de l'effort systolique déduite par la sensation que fournit le pouls. Je crois qu'ils n'ont pas cependant tout à fait échappé à la même erreur, dans leur évaluation de l'énergie réelle de la systole qui suit une émotion vive et soudaine.

1° Cette transmission s'opère-t-elle, du trijumeau sur les origines de l'appareil modérateur du cœur, en restant confinée dans la moitié du bulbe correspondant au côté du nerf impressionné ?

Quand on fait, sur un même animal, la section du trijumeau droit et celle du pneumogastrique du même côté, par exemple, l'excitation nasale avec l'éponge de chloroforme ou autre produit absolument le même effet cardiaque que d'habitude. Le tracé ne diffère en rien de ceux que j'ai précédemment reproduits (fig. 111 et suiv.) et qui étaient obtenus dans l'état d'intégrité complète de l'animal.

Ce résultat prouve bien que les filets de transmission centripète, les centres de réflexion et les origines des voies de transmission centrifuge, sont unis dans une même moitié du bulbe (1).

2° L'impression transmise par le trijumeau d'un côté peut-elle passer, à travers le bulbe, sur les centres modérateurs du côté opposé ?

On fait la section intra-crânienne du trijumeau *droit* et on coupe le pneumogastrique *gauche*.

Dans ces conditions, l'excitation des narines ne peut plus être transmise au centre que par le trijumeau *gauche*, resté intact, et la réflexion sur l'appareil modérateur du cœur ne s'opère plus que par le pneumogastrique *droit*.

L'expérience démontre bien que le cœur se ralentit alors de la même manière que dans le cas précédent, mais en faut-il conclure, sans autre preuve, qu'il s'est opéré un entre-croisement au travers de la substance grise, du trijumeau gauche aux centres modérateurs du côté droit ? Un schéma (2) des

(1) La racine ascendante du trijumeau remonte dans le bulbe à travers la substance grise des faisceaux intermédiaires. Or, ces faisceaux intermédiaires sont reliés aux corps restiformes par des fibres antéro-postérieures, lesquelles constituent précisément les origines des nerfs spinaux, glosso-pharyngiens et pneumogastriques. En d'autres termes : « Si l'on suit le nerf pneumogastrique de dehors en dedans, on le voit traverser la tête gélatineuse, et, par conséquent, la racine ascendante du trijumeau (Farabeuf). » Art. MOELLE ALLONGÉE. — *Dict. encyclop des sc. méd.*

Ces rapports anatomiques donnent bien l'explication du fait physiologique.

(2) L'anatomie, faisant constater que les deux faisceaux intermédiaires du bulbe sont reliés l'un à l'autre par des commissures transversales, permet d'é-

rapports intra-bulbaires de ces différents centres me permettra de mieux expliquer les restrictions que me semble comporter le résultat obtenu.

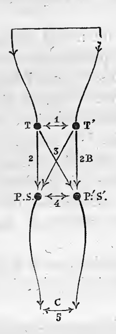


Fig. 128. — Schéma des rapports intra-bulbaires des deux trijumeaux T, T' entre eux (flèche 1) et avec les origines des pneumogastriques (flèches 2, 2 et 3).
Rapports des pneumogastriques et spinaux P S, P' S', d'un côté à l'autre dans le bulbe (flèche 4), dans les ganglions cardiaques C (flèche 5).

Quand j'excite le trijumeau gauche T, l'impression, pour retentir sur le cœur C, peut passer obliquement par la commissure d'entre-croisement 3, de T en P' S'. C'est alors l'action *croisée* du nerf impressionné sur le nerf de réaction.

Mais cette même impression, portée sur le trijumeau gauche T, peut suivre un tout autre trajet : les deux trijumeaux T, T' sont unis entre eux dans le bulbe par une commissure transversale (flèche 1), et l'impression de T, retentissant par cette voie sur T' nous retombons dans l'action *directe* d'un centre sensitif T' sur un centre de réflexion P' S'.

tablir ainsi l'union des racines ascendantes des deux trijumeaux d'un côté à l'autre.

D'autre part, « les fibres du *verrou* (commissure postérieure du bulbe) paraissent unir véritablement certaines petites cellules dépendant des spinaux. » Art. MOELLE ALLONGÉE. — *Dict. encyc. des sc. méd.*

De sorte que l'entre-croisement se ferait de deux façons : 1° d'un trijumeau sur l'appareil spinal-pneumogastrique du côté opposé : *entre-croisement complet ;* 2° d'un trijumeau sur l'autre et de celui-ci sur l'appareil spinal-pneumogastrique situé du même côté. *Entre-croisement partiel (de nerf sensible à nerf sensible).*

Ces remarques justifient la réserve émise au début de cette digression, et si je devais conclure, je ne serais pas plus affirmatif que ne l'ont été les auteurs qui ont écrit sur le trajet des impressions sensitives dans la moelle, et je dirais simplement : « *L'excitation d'un nerf sensible, comme le trijumeau, peut retentir sur l'appareil modérateur cardiaque du côté opposé, soit par entre-croisement complet, soit par entre-croisement partiel : ces deux modes de retentissement sont probablement réunis dans le fonctionnement normal.*

C. *Voies de réflexion des impressions périphériques sur le cœur.*

L'influence suspensive des excitations périphériques sur les battements du cœur, est transmise à cet organe par les nerfs pneumogastriques.

La section de ces deux troncs nerveux supprime, en effet, toute modification cardiaque réflexe, comme le démontre l'exemple suivant :



Fig. 129. — Après la section des deux nerfs pneumogastriques, l'excitation nasale avec l'éponge imbibée d'ammoniaque (en E) ne produit plus le ralentissement du cœur. — L'effet respiratoire persiste.

On comprend, sans qu'il soit utile d'insister davantage sur l'importance de cette preuve décisive, que les voies de transmission centrifuge du bulbe au cœur étant supprimées par la

double section, toute manifestation cardiaque doit être également suspendue. Mais l'arrêt de la respiration se maintient, comme le montre la disparition des courbes respiratoires à partir du moment de l'excitation nasale : notons le fait en

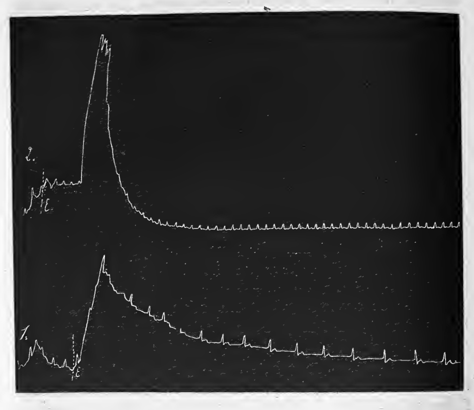


Fig. 130. — Ligne inférieure 1. Effet cardiaque et respiratoire avant l'injection d'atropine.— Excitation en E. — Ligne supérieure 2. Suppression du ralentissement cardiaque après l'excitation E, sous l'influence de l'injection sous-cutanée de 0,0015 milligrammes de sulfate d'atropine. — L'arrêt respiratoire est conservé. (Héliogravure.)

passant, comme témoignant déjà de la dissociation bien nette des deux ordres de phénomènes cardiaques et respiratoires.

La suppression de l'influence bulbaire peut encore être observée d'une autre façon : on sait que certains poisons du cœur anéantissent, pour un temps ou définitivement, l'action modératrice des nerfs pneumogastriques : de ce nombre, et au premier rang, se trouve l'Atropine.

Cet alcaloïde est considéré comme un poison ganglionnaire, et il est admis que c'est sur les extrémités intra-cardiaques

ganglionnaires des nerfs vagues que s'exerce son influence (1). Le double tracé de la figure 130 est destiné à montrer que, sous l'influence d'une faible dose d'atropine (0,0015^{mg}), l'excitation ordinaire (E) ne ralentit plus les battements du cœur (tracé supérieur de la figure), tandis que la même excitation (E tracé inférieur), portée sur les narines avant l'injection de sulfate d'atropine, était suivie du ralentissement réflexe ordinaire.

Il faut faire ici encore la même remarque que pour le cas précédent (section des deux pneumogastriques) : le ralentissement réflexe du cœur est supprimé, mais *l'arrêt respiratoire est conservé;* d'où il résulte que l'arrêt de la respiration qui s'observe à la suite de l'impression est indépendant du ralentissement cardiaque, et qu'il n'y a point de rapport de cause à effet entre les deux phénomènes.

J'ai cité l'exemple de l'empoisonnement par l'atropine, pour démontrer par un moyen indirect la route que suit l'excitation réflexe.

On peut constater, dans la figure 131, que l'intoxication curarique poussée assez loin supprime également la voie centrifuge de l'excitation (ligne supérieure).



Fig. 131.— Suppression du ralentissement réflexe du cœur par le curare (tracé supérieur 1). —Période de paralysie des pneumogastriques qui sont inexcitables par les courants induits. — Réapparition du réflexe cardiaque quand la respiration artificielle a été longtemps maintenue (tracé inférieur 2). Les pneumogastriques sont redevenus excitables. (Héliogr.)

(1) V. Keuchel, *L'atropine et les nerfs d'arrêt*, Dorpat, 1868.
Meuriot, Th. Paris, 1868.
Heidenhain, *Pflüger's Archiv.*, V, anal. par Bernstein (*Centralblatt*), 1872.
Id. *Pflüger's Archiv.*, IX, anal. Rev. Hayem, avril 1875.
Rossbach et Frolich, anal. Rev. Hayem, 1875. (Atropine et Esérine.)

Cette suppression du ralentissement réflexe du cœur coïncide avec l'inexcitabilité des pneumogastriques par des courants induits forts; et l'on voit reparaître l'effet cardiaque dès que les nerfs pneumogastriques sont redevenus sensibles aux excitations directes; le tracé inférieur de la figure 131 a été obtenu dès le début de ce retour aux conditions normales, après 3 heures 1/2 de respiration artificielle, l'animal recommençant aussi à respirer sans secours étranger.

Ces quelques exemples suffisent à démontrer que, la *suppression des pneumogastriques* (section double ou paralysie par l'atropine, le curare, etc.) *entraînant la disparition du ralentissement du cœur, c'est bien par les pneumogastriques que les excitations périphériques retentissent du bulbe sur le cœur.*

Nous avons vu, d'autre part, dans le paragraphe précédent, que le centre de réflexion est bien dans le bulbe rachidien, puisque la section *au-dessous du bulbe*, pas plus que la *section en avant du bulbe et de la protubérance* ne suppriment les réflexes du trijumeau sur le cœur, et qu'enfin la *destruction des centres bulbaires* amène nécessairement la *disparition de l'effet cardiaque.*

Il est maintenant nécessaire, après avoir ainsi délimité les centres de réflexion et les voies de transmission centrifuge, de tenter une analyse plus minutieuse en cherchant par quels filets du tronc des pneumogastriques l'influence bulbaire se transmet au cœur. Tel est l'objet du paragraphe suivant.

D. *Recherche de la part qui revient au spinal dans la transmission centrifuge.*

Il ne m'a point semblé inutile de poser une semblable question : sans doute, il est à peu près admis, depuis les expériences de Waller (1), que ce sont les racines bulbaires du

(1) A. Waller, *C. R. Soc. biol.* et *Gaz. méd.*, Paris, 1856.
Après l'arrachement du spinal, l'excitation électrique du pneumogastrique correspondant n'arrête plus le cœur.
Expériences confirmatives de Heidenhain, Schiff, Dattskiewitch, etc.

spinal réunies dans la branche interne qui constituent les véritables fibres modératrices du tronc du pneumogastrique. Cependant il est difficile de concilier cette donnée devenue presque classique avec les résultats qui découlent des belles recherches du professeur Bernard (1). J'ajouterai que tous les physiologistes n'acceptent pas les conclusions de Waller, et j'ai sous les yeux un travail du professeur Giannuzzi (2), dans lequel il est dit expressément : « La section du spinal et la dégénérescence des filets qu'il fournit au pneumogastrique n'empêchent pas l'excitation du bout périphérique de ce dernier nerf d'agir sur le cœur. »

J'ai donc répété sur plusieurs animaux l'arrachement du spinal par le procédé du professeur Bernard, sans ouvrir le crâne : deux fois seulement l'opération a bien réussi, comme j'ai pu le constater tout d'abord par l'examen sous l'eau des filaments qui terminaient le tronc nerveux arraché, et plus tard par la dissection du bulbe et de la partie supérieure de la moelle.

Les animaux chez lesquels l'arrachement du spinal gauche a réussi avaient subi cinq jours auparavant la section du pneumogastrique droit : par conséquent, une semaine après l'arrachement du spinal, ils pouvaient être considérés, si la théorie de Waller était juste, comme incapables de réagir par un arrêt ou un ralentissement du cœur, aux impressions douloureuses.

Les expériences ordinaires furent répétées sur eux, et l'on voit, dans la figure 132, que l'excitation nasale avec l'ammoniaque (E) ne modifie plus le rhythme du cœur (ligne C), tandis que la respiration (ligne R) se suspend toujours comme si l'animal était intact.

(1) Cl. Bernard. *Sys. nerv.*, *pass.* Discussion des conclusions de Bischoff : « La branche interne du spinal est racine motrice du pneumogastrique, etc. »

Cl. Bernard considère la branche interne comme destinée uniquement au larynx, et rappelle que chez le chimpanzé la branche interne va directement au larynx sans se jeter dans le pneumogastrique (Vrolik).

(2) Giannuzzi, Siena, Roma, 1872. — *Centralblatt*, 1873, anal. *in* Revue Hayem, 1874.

Cette disparition de tout réflexe cardiaque a été constatée maintes fois, dans une même séance et à plusieurs jours d'intervalle, quelle que fût la région sensible impressionnée.

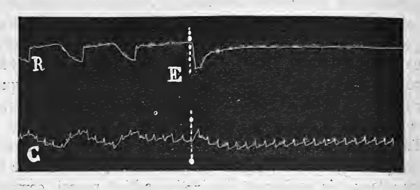


Fig. 132. — Suppression du ralentissement réflexe du cœur (ligne C), à la suite de l'excitation nasale avec l'ammoniaque (en E), chez un lapin dont le pneumogastrique droit est sectionné depuis 12 jours et le spinal gauche arraché depuis 7 jours. — La respiration est, au contraire, suspendue (ligne R, tracé du pneumographe), comme chez l'animal intact. (Héliogravure.)

L'excitation directe du pneumogastique du côté où le spinal avait été arraché ne produisait ni arrêt, ni ralentissement du cœur.

Voilà le résultat obtenu dans ces deux cas où l'arrachement avait été complet; je ne puis l'expliquer autrement que par la suppression des tubes nerveux qui transmettent au cœur l'influence des centres modérateurs bulbaires, et je suis amené à considérer l'anastomose de la branche interne du spinal (racines bulbaires) comme la voie par laquelle cette influence modératrice du bulbe est transmise au cœur (1).

Si nous résumons maintenant les données fournies par l'expérience sur les centres de réflexion et sur les voies de trans-

(1) M. Cyon, auquel je faisais part de ces résultats, m'a fait l'objection que voici : l'arrachement du spinal s'accompagne forcément de tiraillement, de lésion du pneumogastrique lui-même. A cela on pourrait répondre que si le pneumogastrique était lésé du côté où le spinal est arraché, les animaux qui ont déjà l'autre pneumogastrique *réséqué* ne survivraient pas deux mois et six mois comme ont survécu les deux opérés dont j'ai parlé : la suppression des deux pneumogastriques est suivie de mort, comme chacun sait, soit au bout de quelques heures, soit au bout de deux ou trois jours au plus chez le lapin.

mission centrifuge des excitations des nerfs sensibles, nous arrivons aux conclusions suivantes :

1° Les excitations des nerfs sensibles (extrémités périphériques, troncs, racines) retentissent sur le bulbe rachidien (chap. II, A);

2° Dans le bulbe, ces excitations sont réfléchies, soit directement, soit après entre-croisement, sur les centres modérateurs du cœur (chap. II, B);

3° L'influence modératrice (ayant pour effet l'arrêt ou le ralentissement) est transmise au cœur par le tronc des pneumogastriques (chap. II, C);

4° Dans le tronc des pneumogastriques, ce sont les fibres provenant des racines bulbaires des nerfs accessoires qui constituent les organes de transmission (chap. II, D);

5° La suppression des centres de réflexion, des voies de transmission (troncs pneumogastriques ou branche interne du spinal), des ganglions terminaux intra-cardiaques (par l'atropine, le curare (?), entraîne la disparition des troubles cardiaques provoqués par l'excitation des nerfs sensibles (chap. II, C. D).

CHAPITRE III.

QUELLE EST LA PART DE L'ÉLÉMENT DOULEUR DANS LES ARRÊTS DU CŒUR QUI SUCCÈDENT A L'EXCITATION DES NERFS SENSIBLES?

Les troubles cardiaques (arrêts passagers ou syncopes) ont été maintes fois observés chez l'homme, sous l'influence de l'émotion (1) causée par exemple par l'annonce d'un événement pénible faite sans ménagement, brusquement : le choc a retenti *du cerveau sur le cœur*.

Dans les excitations intenses des nerfs périphériques, ce choc cérébral intervient-il comme cause unique ou partielle? En d'autres termes, est-il *nécessaire* que l'impression soit *douloureusement perçue* pour que les troubles cardiaques, dont nous avons cité de nombreux exemples, se produisent? ou bien suffit-il que le centre bulbaire soit excité par l'impression périphérique?

J'ai essayé cette analyse en employant plusieurs moyens pour supprimer la douleur : les anesthésiques, les narcotiques, la commotion cérébrale, l'asphyxie, etc.

(1) Cl. Bernard, Conférence de la Sorbonne, mars 1865 :

« Quelquefois un mot, un souvenir, la vue d'un événement, éveillent en nous une douleur profonde. Ce mot, ce souvenir ne sauraient être douloureux par eux-mêmes, mais seulement par les phénomènes qu'ils provoquent en nous.

Quand on dit que le cœur est brisé par la douleur, il se produit des phénomènes réels dans le cœur. *Le cœur a été arrêté, si l'impression douloureuse a été trop soudaine :* le sang n'arrivant plus au cerveau, la syncope et des crises nerveuses en sont la conséquence. On a donc bien raison, quand il s'agit d'apprendre à quelqu'un une de ces nouvelles terribles qui bouleversent notre âme, de ne la lui faire connaître qu'avec ménagement. »

Il était naturel, en effet, de considérer ces moyens comme susceptibles d'éclairer la question. Si le cœur n'était plus modifié par les excitations périphériques pendant le sommeil anesthésique, c'est que la perception douloureuse est une étape nécessaire : nous verrons qu'en réalité le problème est loin d'être aussi simple.

Examinons d'abord les effets du chloral, de la morphine seule ou associée au chloroforme, de l'asphyxie et de la commotion des centres nerveux :

1. *Chloral.* — L'injection intrà-veineuse de chloral, faite assez loin du cœur et avec une lenteur suffisante pour que la dilution ait le temps de s'opérer dans le sang, constitue, comme l'ont bien démontré les expériences du professeur Oré, de Bordeaux, sur des animaux variés, un moyen précieux pour immobiliser le sujet (1).

Cet animal immobile sent-il ou ne sent-il pas ? Si nous nous fondons sur la réaction si fidèle du cœur, nous affirmerons qu'il ne sent pas : les excitations les plus douloureuses ne troublent pas plus son cœur qu'elles ne font tressaillir ses muscles *quand la chloralisation est suffisante.*

Mais rapprochons cette absence de réaction cardiaque du défaut de resserrement vasculaire qui s'observe quand on excite le sciatique avec des courants induits forts chez un animal profondément chloralisé (2). L'un et l'autre faits s'expliquent de la même manière : ***Le chloral paralyse le système nerveux modérateur du cœur tout aussi bien qu'il paralyse le système nerveux vaso-moteur.***

Chez les animaux dont j'excitais les nerfs périphériques pendant le sommeil chloralique, l'absence de tout ralentisse-

(1) Si le chloral n'est point à proprement parler un anesthésique, mais plutôt un hypnotique (Cl. Bernard), il met du moins les animaux dans un tel état de résolution musculaire qu'on peut pratiquer sur eux les vivisections les plus pénibles sans qu'ils manifestent par un mouvement qu'il y ait perception de la douleur. Ils dorment, mais si profondément que ce sommeil chloralique ressemble à s'y méprendre à la plus complète anesthésie chloroformique.

(2) M. Carville (Pélissier, Th. Paris, 1873 : Emploi du chloral dans les accouchements) a vu que la pression artérielle peut n'être pas augmentée ou ne l'être que très-peu quand on vient à exciter violemment le sciatique.

C'est, du reste, un fait bien établi aujourd'hui que le chloral produit la paralysie vaso-motrice.

ment du cœur m'a conduit à interroger directement l'excitabilité des nerfs pneumogastriques. J'ai toujours constaté que *les nerfs d'arrêt du cœur étaient absolument inexcitables quand la réaction cardiaque de la douleur faisait défaut.*

Il est probable que la douleur n'est point perçue ; mais quel moyen avons-nous de nous en assurer, puisque les instruments de la manifestation extérieure de cette perception sont supprimés par le chloral ?

2. *Chloroforme.* — Le même résultat a été constaté avec le chloroforme. L'anesthésie étant obtenue en plaçant l'animal sous une cloche, dans une atmosphère de chloroforme, ou en administrant l'anesthésique par la voie trachéale, les excitations qui sont toujours suivies à l'état normal de troubles cardiaques (arrêt ou ralentissement) restaient absolument sans effet quand l'animal était dans la résolution complète. Si alors on découvrait le pneumogastrique droit (presque toujours le plus actif), et si l'on excitait son bout périphérique, l'arrêt du cœur ne se produisait pas.

Dans ce cas encore, la douleur elle-même peut être supprimée ; nous devons même être convaincus qu'elle n'existe plus ; mais quand elle persisterait, l'impuissance des nerfs qui en transmettent la manifestation nous empêcherait de nous en apercevoir (1).

Cette inexcitabilité des pneumogastriques pendant l'anesthésie chloroformique me semble constituer pour les opérés l'un des plus grands bienfaits de l'anesthésie : en effet, *le cœur ne peut plus être arrêté :* la syncope si redoutée n'a plus le moyen de se produire. Mais, pour arriver à cette *pé-*

(1) Le curare paralyse, lui aussi, et les nerfs des muscles volontaires, et les pneumogastriques, et les nerfs vasculaires. On doute que ce poison qui immobilise l'animal supprime sa sensibilité à la douleur.

Faudrait-il penser que le chloral, le chloroforme, etc., qui anéantissent pour un temps la manifestation motrice, sont, eux aussi, de simples moyens d'immobilisation et n'empêchent point la sensation douloureuse d'être perçue? Les observations sur l'homme sont là pour nous rassurer : non pas qu'on doive s'en rapporter seulement à l'absence de souvenir des opérés ; mais certains détails de leurs actes expressifs pendant les premières phases du chloroforme, leurs chants, par exemple, que n'interrompt pas l'incision de la peau, etc., prouvent bien, je crois, que la sensibilité s'émousse par degrés et finit par disparaître.

riode de tolérance du cœur, il faut traverser les premières phases de la chloroformisation, et celles-là se caractérisent *par une plus grande susceptibilité des nerfs d'arrêt du cœur ;* aussi, mieux vaudrait ne point anesthésier du tout que d'opérer en pleine période d'excitation (1).

3. *Morphine*. — La narcotisation avec la morphine présente une série de phases pendant lesquelles les réflexes cardiaques s'atténuent graduellement et finissent par disparaître.

Tant que le cœur se ralentit encore sous l'influence des excitations périphériques, l'excitabilité du nerf pneumogastrique est conservée ; mais, à la période avancée où les impressions douloureuses ne retentissent plus sur le cœur, l'excitation directe du nerf d'arrêt reste sans effet sur lui.

On peut suivre l'extinction progressive des troubles cardiaques dans la figure de la page suivante (fig. 133).

Je dirai donc de la morphine ce que je disais plus haut du chloral et du chloroforme : l'animal percevrait-il encore, que son cœur ne saurait plus manifester la sensation douloureuse.

Comment pourrons-nous donc dissocier ces phénomènes ? Les anesthésiques, les narcotiques nous montrent bien que le cœur ne réagit plus par l'arrêt ou le ralentissement, mais nous ne savons pas quelle part il faut faire à la douleur, puisque les instruments de sa manifestation font défaut.

Autrefois, Legallois voyait mourir les animaux dont il détruisait la moelle avec un stylet enfoncé dans le canal rachi-

(1) M. Maurice Perrin, qui a fait de ces accidents une étude si complète, disait au Congrès de Bruxelles : « Opérer avant que l'anesthésie ne soit confirmée, c'est s'exposer à ces brusques retours de la sensibilité qui sont si fréquents pendant la durée de l'anesthésie incomplète... Mais surtout, c'est ajouter, par l'action prématurée de l'instrument tranchant, une excitation puissante aux perturbations réflexes qui constituent, comme nous croyons l'avoir démontré, un des principaux dangers de l'état anesthésique. (Congrès de Bruxelles, septembre 1875.)

Nous ne saurions admettre, par conséquent, la dernière conclusion du mémoire de M. R. Vigouroux (*C. R. Acad. Sc.*, févr. 1861) : qu'il ne faut pas attendre que la résolution soit complète pour commencer une opération, mais qu'il est indiqué d'opérer dans la première phase de l'anesthésie.

dien. Il attribuait cette mort à la destruction des influences actives des centres nerveux rachidiens.

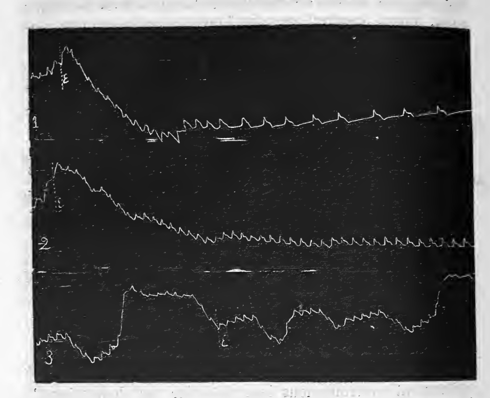


Fig. 133. — Disparition progressive des troubles cardiaques provoqués par l'excitation du trijumeau E, lignes 1, 2, 3. — L'animal est sous l'influence croissante de la morphine. — Quand l'excitation périphérique reste sans aucun effet (ligne inférieure), les nerfs pneumogastriques ne répondent plus à l'excitation directe.

Wilson Philipps remarqua que l'opération était supportée quand on prenait la précaution d'insensibiliser les animaux par un coup sur la tête. Il semble donc que la suppression de la douleur dans les expériences de W. Philipps ait supprimé la cause de la mort par arrêt du cœur. En effet, la commotion violente suspend la perception douloureuse, mais j'ai constaté que les nerfs pneumogastriques cessent aussi de fonctionner sous cette influence (1).

(1) Ces expériences sur les effets de la commotion cérébrale ont été répétées avec le professeur Marey.

Nous avons bien constaté que l'excitation du bout inférieur d'un pneumogastrique n'arrête plus le cœur quand l'animal est sous l'influence du choc.

Il en est de même pour l'asphyxie (1) : des animaux soumis à l'asphyxie progressive dans une atmosphère confinée présentent, pendant les premières phases de l'asphyxie, des troubles cardiaques évidents (ralentissement) (fig. 134, ligne 1), quand on excite un nerf sensible, le sous-orbitaire dans ce cas. Ce ralentissement réflexe a complétement disparu plus tard, quand l'asphyxie est très-avancée. (Fig. 134, ligne 2.) A cette période, les pneumogastriques n'arrêtent plus le cœur.

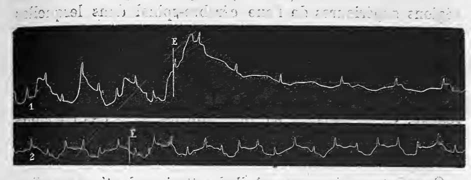


Fig. 134. — Tracé supérieur, 1. — Début de l'asphyxie (air confiné). — On excite le nerf sous-orbitaire en E. Ralentissement considérable du cœur. — Tracé inférieur, 2. — Asphyxie avancée. La même excitation E ne provoque plus aucun ralentissement réflexe du cœur.

On voit que tous ces essais de *suppression de la douleur* (anesthésie, sommeil, commotion, asphyxie, etc.) ont abouti à la *suppression de l'instrument nécessaire aux centres nerveux pour témoigner de la douleur perçue*. Dans tous les cas, les pneumogastriques étaient incapables d'influencer le cœur.

La question que je me suis posée au début de ce chapitre,

Mais nous devons reconnaître combien il est difficile d'interpréter cet effet suspensif d'une commotion du crâne.

Le professeur Marey a pensé que les troubles profonds déterminés par ce traumatisme dans la circulation périphérique méritent d'être pris en sérieuse considération, et des expériences spéciales doivent être instituées sur ce sujet.

(1) Cl. Bernard, *Anesthésiques*, p. 420 : « Il est vrai que l'oxyde de carbone peut être anesthésique, mais, à ce titre, l'*acide carbonique* le serait de même. »

Du reste, que l'asphyxie reconnaisse pour cause un excès d'acide carbonique ou un défaut d'oxygène dans le sang (P. Bert), le fait principal est le *défaut d'hématose suffisante*.

Recherche de la part qui revient à l'élément douleur dans les arrêts du cœur survenant à la suite de l'excitation des nerfs sensibles, cette question ne peut être tranchée à l'aide de moyens qui suppriment à la fois (je le crois ainsi du moins) la sensibilité de l'animal et ses moyens de réaction.

Si, maintenant, nous nous reportons à une expérience citée plus haut à un autre point de vue, *l'ablation des hémisphères cérébraux*, nous pouvons noter que le ralentissement du cœur est conservé (fig. 126) malgré la suppression de ces régions supérieures de l'axe cérébro-spinal dans lesquelles on place les centres de perception.

Si cette localisation est rigoureuse, nous pouvons considérer l'arrêt ou le ralentissement du cœur sous l'influence d'une excitation périphérique comme un *réflexe bulbaire*. Mais ce réflexe, avons-nous dit en rappelant les effets des émotions pénibles et soudaines chez l'homme, ce réflexe peut avoir aussi sa source dans les hémisphères cérébraux.

Quand on enlève ceux-ci, j'admettrais volontiers que l'on supprime *une cause* du réflexe bulbaire, la douleur *perçue*, sans faire, pour cela, disparaître les autres voies de transmission vers le bulbe.

En résumé, un homme ou un animal, soumis à des excitations périphériques douloureuses peut présenter les troubles cardiaques indiqués, *pour deux raisons qui sont réunies et concourent au même résultat chez un sujet intact :* d'abord la transmission centripète pure et simple le long du nerf sensible et des conducteurs centraux (substance grise, etc.); ensuite la douleur *perçue* qui retentit sur les centres d'arrêt du cœur, en ajoutant son influence à la première.

Supprimez l'une de ces deux voies, *la perception cérébrale*, l'effet se produira encore (chez les animaux sans hémisphères): ce sera un réflexe ordinaire, rien de plus.

Faites subir *d'emblée* la secousse douloureuse aux hémisphères cérébraux (*émotion soudaine*), *sans impressionner les nerfs périphériques*, l'arrêt du cœur se produira aussi.

Mais si l'on suspend, avec le chloroforme, le chloral, etc.,

l'activité des appareils modérateurs du cœur, il est certain que l'effet cardiaque ne pourra plus avoir lieu, quelle que soit la source de l'impression, si même cette impression pouvait encore passer à l'état de perception, ce que la clinique chirurgicale et obstétricale démontre ne pas être.

SECONDE PARTIE.

La première partie de ce travail a été consacrée à l'étude des effets que produisent les excitations des nerfs sensibles sur le cœur et sur la respiration. Il n'a été question que d'une manière tout à fait incidente des modifications subies par la pression artérielle sous la même influence : ce sont ces modifications que je me propose de passer en revue dans la seconde partie.

Je ne ferai qu'indiquer les points principaux de ce vaste sujet, dont beaucoup d'importants détails feront l'objet d'un mémoire spécial. Je tiens surtout à mettre en relief les conditions des désaccords apparents si souvent mentionnés : on voit tantôt une élévation, tantôt un abaissement de la pression artérielle succéder à l'excitation d'un nerf sensible (1). Cette différence me paraît tenir aux variations parallèles subies

(1) M. C. Cyon (*C. R. Acad. des sciences*, août 1869) avait pensé que les irrégularités des changements de la pression artérielle qu'on observe chez les animaux dont on excite les nerfs sensibles pouvaient tenir à l'intervention des centres des sensations, ces centres étant considérés comme antagonistes des centres vaso-moteurs bulbaires. Mais les expériences de Dittmar (*Berichte der Königl. Sachs. der Wissenschaften*, mars 1870), de Heidenhain (*Pflüger's Archiv*, Bd. III, Bd. IV, Bd. IX), de Owsjannikow (*Pflüger's Archiv*, 6 mai 1871, S. 135) démontrent qu'il n'est pas nécessaire que les lobes cérébraux soient conservés pour qu'il se produise une augmentation de la pression sanguine sous l'influence de l'irritation des nerfs sensibles (Galvanisation du sciatique). (Voir le rapp. de MM. Masius et Vanlair. Congrès de Bruxelles, 1875.) J'ai constaté, de mon côté, que l'ablation des lobes cérébraux n'abolissait pas plus le réflexe cardiaque (V. *supra*, 1re partie, chap. III) qu'elle ne supprime le réflexe vaso-constricteur, à la condition qu'on laisse aux animaux un temps de repos suffisant après l'opération.

par la fonction cardiaque, variations dont il n'a pas été tenu assez compte, à ma connaissance du moins, dans l'interprétation des différences observées.

Nous aurons donc à examiner successivement les points suivants :

1° Causes qui peuvent faire varier la pression artérielle (action du cœur, de la respiration, des nerfs vasculaires) ;

2° Recherche de la part qui revient à chacune de ces influences dans les changements de pression qui suivent l'excitation des nerfs sensibles ;

3° Indications sommaires des combinaisons entre l'influence vaso-motrice et l'influence cardiaque.

CHAPITRE PREMIER.

CAUSES QUI FONT VARIER LA PRESSION ARTÉRIELLE.

A. *Action du cœur.*

Si l'on suppose un système artériel vide dans lequel le cœur lance des ondées égales, équidistantes, la pression s'élèvera par saccades dans les artères, jusqu'à un moment où l'écoulement par les capillaires compensera l'afflux : le régime régulier de la pression (Marey) se trouvera dès lors établi.

Cet état de la pression artérielle variera si le cœur qui l'a produit est modifié dans sa fonction. Le meilleur exemple qu'on en puisse donner est l'abaissement considérable qui accompagne le grand ralentissement des battements du cœur provoqué par l'excitation *directe ou réflexe* du nerf pneumogastrique.

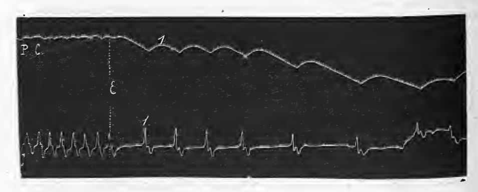


Fig. 135. — PC. Pression carotidienne du lapin.— C. Pulsations du cœur.— Au point E, on excite les narines avec une goutte d'ammoniaque.— Le cœur se ralentit considérablement, la pression s'abaisse. — A la fin du tracé deux pulsations plus rapprochées se produisent, la pression commence à remonter.

Or, sans aller plus loin, rappelons que, dans les expériences dont il a été question précédemment, nous avions affaire à des arrêts ou à des ralentissements du cœur provoqués par l'excitation *réflexe* des nerfs pneumogastriques ; il paraît donc tout à fait légitime de subordonner l'abaissement de la pression artérielle, noté en même temps que le ralentissement du cœur, à la même cause, l'excitation réflexe des nerfs modérateurs du cœur.

B. *Action du système nerveux vaso-moteur.*

L'excitation des nerfs périphériques retentit, comme on sait, sur les centres des nerfs vasculaires, tout aussi bien que sur les centres modérateurs du cœur.

L'un des plus sûrs moyens d'obtenir une grande élévation de la pression est l'électrisation du bout central du nerf sciatique. L'excitation périphérique se réfléchit, des centres vaso-moteurs où elle a été conduite par les filets impressionnés, sur les nerfs vaso-constricteurs du corps entier, et l'on admet que c'est principalement au resserrement consécutif des vaisseaux abdominaux qu'est due l'augmentation de la pression.

Il est facile de constater la réalité de ces réflexes vaso-moteurs en éliminant les influences étrangères qui pourraient masquer le phénomène, et la première que l'on doive écarter, c'est l'effet antagoniste du ralentissement du cœur.

C'est ce qui a été obtenu dans l'expérience dont la figure 136 rappelle les traits principaux. Les deux pneumogastriques avaient été coupés chez un lapin (1), et l'excitation nasale avec l'ammoniaque ne pouvait plus retentir sur le cœur pour le ralentir par action réflexe. Mais l'effet de cette excitation sur les centres vaso-moteurs et par suite sur la pression artérielle n'était nullement entravé, aussi voyons-nous, à partir du moment de l'excitation, la pression carotidienne s'élever considérablement : de 10 centimètres de mercure, elle monte à 17 en moins de 12 secondes.

(1) On sait que, chez le lapin, la double section des nerfs pneumogastriques n'entraîne pas, comme chez le chien, une accélération notable des battements

Le fait qui se déduit directement de l'expérience (fig. 136), c'est que si le cœur n'est pas influencé par l'excitation périphérique, le resserrement réflexe des vaisseaux *est en mesure* de produire l'élévation de la pression, et que si au contraire la fonction cardiaque est profondément modifiée (fig. 135), le resserrement vasculaire reste sans effet appréciable.

Ces deux résultats peuvent s'associer et s'associent en effet dans les expériences faites sur l'animal intact; prenons pour exemple la figure de la page suivante (fig. 137) :

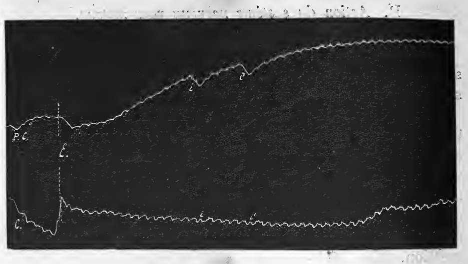


Fig. 136.— Élévation considérable de la pression carotidienne P. C. par réflexe vaso-moteur, à la suite de l'excitation nasale en E. — Les pulsations de cœur (C) ne sont point modifiées, la double section des pneumogastriques supprimant le réflexe cardiaque (*a*). — Trachéotomie sans respiration artificielle.

du cœur et qu'on n'observe pas chez lui l'élévation de la pression qui est si considérable après cette opération chez le chien, le cheval, etc.

(*a*) Il se présente dans ces conditions un fait d'un grand intérêt que je signale ici sans autres commentaires : on voit dans la figure 136 deux intermittences (*i*, *i'*) du pouls carotidien : en se reportant au tracé de la pulsation cardiaque (C) recueilli simultanément, on remarque, dans les points correspondants, deux ondulations (*i*, *i'*) qui ne sont point des systoles franches : ce sont des systoles *avortées*, insuffisantes à vaincre la pression aortique et par suite à retentir sur la pression carotidienne.

Ces détails seront étudiés avec beaucoup d'autres dans un prochain travail. Je rappelle ici un mémoire récent de Knoll (dont je n'ai pu me procurer l'indication bibliographique complète) et dans lequel l'auteur attribue des irrégularités du même genre à l'augmentation de la pression intra-cardiaque. Cette hypothèse paraît très-judicieuse, et je suis très-disposé à l'accepter pour les intermittences dont il est question. (V. à ce sujet le mémoire VIII du professeur Marey, p. 334).

Dans ce cas où les pneumogastriques étaient intacts, l'excitation périphérique a ralenti les pulsations du cœur (ligne C), mais remarquons bien que *ce ralentissement est peu considérable* comparativement à celui de la figure 135 ; la même excitation s'est également réfléchie sur l'appareil musculaire des vaisseaux qui se sont resserrés sous cette influence.

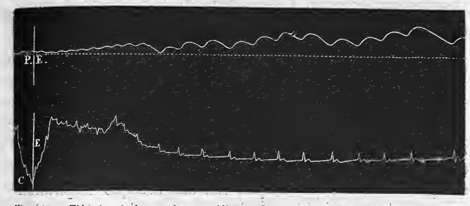


Fig. 137. — Élévation de la pression carotidienne (P) consécutive à l'excitation nasale (E). — Ralentissement du cœur (ligne C), provoqué par la même excitation. (Lapin trachéotomisé.)

Si nous observons ici les effets de cette constriction vasculaire réflexe, c'est que le cœur, *peu ralenti*, peut fournir encore au système artériel une quantité de sang suffisante pour que le resserrement des vaisseaux produise l'élévation de la pression. Mais cette élévation elle-même est restreinte (3 centimètres de mercure), si on la compare à l'élévation notée figure 136 (7 centimètres); la différence s'explique par la diminution de l'action cardiaque dans le premier cas, par sa conservation dans le second.

Nous voilà donc amenés à considérer *comme condition essentielle* des différences observées dans les changements de la pression après les excitations périphériques, *le fonctionnement même du cœur*, et, par fonctionnement, j'entends surtout le *rhythme* et le *débit*.

Il serait prématuré maintenant d'aller plus loin et de développer ici des considérations que l'expérience n'aurait pas suffisamment sanctionnées. J'ai dit que je voulais seulement indiquer le sens probable de l'interprétation des désaccords

apparents, et que je présenterais dans un prochain travail les résultats de recherches détaillées (1).

Je ne veux point cependant quitter ce sujet sans discuter l'intervention d'une influence importante dans les effets observés du côté de la pression artérielle à la suite des excitations périphériques : l'influence de la respiration, soit comme agent mécanique, soit comme cause de modification dans la proportion des gaz du sang. Cette discussion fera l'objet du paragraphe suivant.

C. *Indépendance des variations de la pression et des troubles respiratoires provoqués par l'excitation des nerfs sensibles.*

Dans toutes les expériences sur les effets de l'excitation des nerfs sensibles, on note la suspension plus ou moins prolongée de la respiration. Toujours, sauf dans certains cas absolument exceptionnels, l'animal surpris fait une brusque inspiration au moment même de l'impression ; à ce premier acte succède l'arrêt des mouvements respiratoires. *La poitrine s'affaisse très-lentement*, et, après un temps variable, la respiration reparaît avec ou sans mouvements généraux.

J'ai déjà signalé l'indépendance des *troubles cardiaques* et de l'*arrêt respiratoire ;* ce sont deux ordres de phénomènes parallèles, subordonnés à la même cause, mais reconnaissant chacun un mécanisme particulier. L'un n'exclut pas l'autre ; chacun peut se produire d'une façon isolée.

En est-il de même pour les changements qui s'observent dans la pression artérielle en même temps que dans la respiration?

L'arrêt des mouvements respiratoires en expiration pouvait faire supposer que la pression artérielle s'élève, soit à cause de l'*augmentation de la pression intra-thoracique*, soit *à cause de l'accumulation d'acide carbonique* (*ou du défaut d'oxygène*) *dans le sang*.

(1) Ce travail, particulièrement consacré à l'étude des rapports de la pression artérielle et de la fréquence des battements du cœur, renfermera de nouvelles recherches sur les effets vasculaires et cardiaques produits par l'excitation du nerf dépresseur de MM. Ludwig et Cyon. Aussi ai-je cru devoir m'abstenir ici de formuler aucune critique sur ce sujet.

Quelques expériences bien simples nous amèneront à cette double conclusion :

1° Que l'effort n'est pour rien dans l'augmentation observée du côté de la pression ;

2° Qu'il n'y a point à tenir compte d'une modification dans la proportion des gaz, acide carbonique ou oxygène, dissous ou combinés dans le sang.

1° *L'effort ne peut expliquer l'élévation de la pression pendant l'arrêt respiratoire qui suit l'excitation des nerfs sensibles.*

a) La glotte des animaux n'est pas fermée; comme il est facile de le constater en observant le dégonflement progressif de la poitrine, le déplacement d'un corps léger placé devant les narines, etc. Or, il n'y a point d'augmentation de pression intra-thoracique *suffisante* pour élever *notablement* la pression artérielle quand l'issue de l'air hors du poumon s'opère facilement.

b) Pour plus de sûreté, on fait respirer l'animal par une canule trachéale bifurquée; une branche s'ouvre à l'air libre, l'autre branche communique avec un manomètre à eau ou avec un tambour à levier inscripteur : pendant l'arrêt respiratoire, on pince le tube ouvert à l'extérieur, et la pression intra-thoracique s'exerce en totalité, soit sur le manomètre à eau, soit sur la membrane du tambour à levier inscripteur; on s'assure alors que l'affaissement graduel de la poitrine ne s'accompagne que d'une augmentation insensible de la pression.

Donc, point d'influence mécanique de l'arrêt respiratoire qui puisse expliquer l'élévation de la tension artérielle quand elle existe.

2° Ce n'est point davantage à l'accumulation d'acide carbonique ou au défaut d'oxygène dans le sang pendant l'arrêt respiratoire, qu'est due l'augmentation de la pression.

Ce serait sortir des limites du sujet que de discuter ici la cause réelle de l'ascension de la courbe de pression observée par Traube, Thiry, etc. (1), courbe connue sous le nom de « courbe asphyxique. » On a supposé, en effet, que pendant l'arrêt respiratoire, l'acide carbonique accumulé dans le sang

(1) Traube, *Gezammelte Beitrage z. Path. u. Physiol.*, Bd. I, *pass*, 1865.— Thiry, *Centralbl.*, octobre 1864.

artériel détermine une excitation des centres vaso-moteurs bulbaires, d'où resserrement vasculaire, et élévation consécutive de la pression.

Que ce soit à l'excès d'acide carbonique, au défaut d'oxygène ou à telle ou telle autre modification dans la proportion du gaz du sang qu'est due l'élévation de la pression notée par Traube, il est bien certain que l'élévation observée dans nos expériences ne relève point de cette cause.

Une série de faits le démontre; j'en rappellerai quelques-uns seulement :

a) Un animal curarisé est soumis à la respiration artificielle : ses pneumogastriques sont coupés et on n'a pas poussé la curarisation jusqu'à la période de paralysie des nerfs vaso-moteurs; l'excitation nasale produit encore l'élévation de la pression artérielle; il est évident que l'animal, continuant à recevoir de l'air, ne peut avoir d'accumulation d'acide carbonique dans le sang, et cependant l'augmentation de la pression artérielle se produit absolument comme dans le cas de la figure 136.

b) On met un lapin en état d'apnée (par insufflations trachéales d'air chargé d'oxygène); quand on suspend l'insufflation et que la respiration est arrêtée, on observe encore l'élévation de la pression artérielle après l'excitation périphérique (quand le ralentissement réflexe du cœur n'est pas très-considérable). Ici, on ne peut invoquer ni l'accumulation d'acide carbonique, ni le défaut d'oxygène dans le sang pour expliquer l'augmentation de la pression.

Cette revue succincte est suffisante pour démontrer que l'élévation de la pression carotidienne (observée quand le cœur n'est pas ralenti ou ne l'est que modérément) n'est point sous la dépendance de l'arrêt respiratoire ; les deux conditions qui auraient pu être invoquées, l'effort et la modification dans la proportion du gaz du sang, sont en effet éliminées dans les deux groupes d'expériences que nous avons rappelés.

Nous nous rattachons donc à l'interprétation déjà proposée : l'excitation transmise aux centres vaso-moteurs bulbaires et réfléchie par eux sur les nerfs vasculaires.

RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS.

PREMIÈRE PARTIE.

TROUBLES CARDIAQUES ET RESPIRATOIRES PROVOQUÉS PAR LES IMPRESSIONS DOULOUREUSES.

L'arrêt diastolique (ou le ralentissement plus ou moins considérable du cœur) et la suspension de la respiration, observés à la suite de l'excitation des narines du lapin par l'attouchement avec des liquides irritants et volatils, ne forment qu'un cas particulier d'une loi générale exprimée par le professeur Cl. Bernard en ces termes : « *L'arrêt du cœur ou syncope peut succéder à toute action perturbatrice violente et subite, de quelque nature qu'elle soit.* »

Chez l'homme, un grand nombre d'intermittences du cœur, de syncopes et quelques morts subites, ne reconnaissent pas d'autre cause qu'une impression douloureuse violente, quelle qu'en soit l'origine (cérébrale ou périphérique).

Les appareils précis employés pour l'exploration et l'inscription des battements du cœur, des variations de la pression artérielle, des mouvements respiratoires, etc., permettent de saisir un arrêt passager du cœur et bien d'autres détails qui ont pu échapper à l'observation simple.

Si l'on excite, avec des irritants variés, les principaux nerfs sensibles, on arrive aux résultats généraux suivants :

Les excitations des *narines* avec l'ammoniaque, l'acide acétique, le chloroforme, sont transmises au bulbe rachidien (spécialement mais non exclusivement par le trijumeau), tout comme les impressions douloureuses produites par l'attouche-

ment avec une aiguille rougie, ou par une forte décharge d'induction.

Le retentissement s'opère sur le cœur par l'intermédiaire des pneumogastriques, et l'effet est proportionnel à *l'intensité* de l'excitation; mais il faut tenir compte de la *soudaineté* de l'impression, de la *durée* d'application de l'excitant et de *l'étendue de la surface* impressionnée.

L'excitation de la *muqueuse laryngée* avec les mêmes agents produit des arrêts du cœur et de la respiration très-accusés, quand elle atteint la région *sus-glottique* (nerfs laryngés supérieurs), des effets presque nuls quand elle porte sur la région *sous-glottique* (nerfs laryngés récurrents et anastomose de Galien).

Les excitations des nerfs rachidiens (branches auriculaires du plexus cervical, racines postérieures, nerfs sciatique et crural, déterminent aussi un ralentissement ou un arrêt du cœur (suivant l'intensité de l'excitation) et un arrêt respiratoire.

Les nerfs *viscéraux* (nerfs des plexus mésentériques) irrités surtout après inflammation préalable, deviennent le point de départ d'actes réflexes identiques aux précédents, soit chez la grenouille, soit chez les mammifères.

Le bulbe rachidien est le centre par lequel doivent nécessairement passer, pour y être transformées en incitations centrifuges, toutes les impressions périphériques assez intenses pour amener des perturbations cardiaques.

Le trajet suivi dans la substance grise du bulbe a été étudié spécialement pour les excitations du trijumeau : les expériences et l'anatomie permettent de considérer comme réelle l'union des noyaux des trijumeaux entre eux, et avec les noyaux des nerfs spinaux et pneumogastriques; cette union est opérée par des connectifs directs et entre-croisés.

C'est par les nerfs pneumogastriques que s'exécute la transmission centrifuge des impressions réfléchies sur le cœur, mais ce sont les anastomoses des racines bulbaires des nerfs spinaux qui constituent les voies de réflexion.

Comme corollaire de tout ce qui précède, on peut dire : la suppression des centres de réflexion (bulbe), des voies de

transmission centrifuge (tronc du pneumogastrique ou branche interne du spinal), entraîne la disparition des troubles cardiaques provoqués par l'excitation des nerfs sensibles.

En cherchant à supprimer l'élément douleur pour savoir s'il était nécessaire que l'impression fût perçue, on s'aperçoit que le chloroforme, le chloral, la morphine, l'asphyxie et la commotion cérébrale font disparaître les troubles cardiaques qui s'observent quand l'animal est sensible. Mais dans tous ces cas, les pneumogastriques se montrent complétement inexcitables ; l'animal n'a donc plus les organes nécessaires à la manifestation extérieure d'une douleur perçue ; ce qui n'implique en aucune façon, comme le prouve la pratique chirurgicale, que les moyens anesthésiques permettent encore la perception douloureuse.

La conservation de l'arrêt respiratoire dans les cas où on a supprimé le réflexe cardiaque, par la section des pneumogastriques, par l'injection d'atropine, etc., démontre l'indépendance des deux ordres de phénomènes cardiaques et respiratoires.

SECONDE PARTIE.

INFLUENCE DES EXCITATIONS DOULOUREUSES SUR LES VARIATIONS DE LA PRESSION ARTÉRIELLE.

Les désaccords apparents des résultats observés sont liés à une condition essentielle dont on n'a point suffisamment tenu compte. Si l'on a constaté à la suite des excitations périphériques tantôt une augmentation, tantôt un abaissement de la pression artérielle, ces variations paraissent subordonnées, non à la participation du cerveau, mais aux variations parallèles de la fonction cardiaque, ceci s'appliquant spécialement au *rhythme* et au *débit* du cœur.

Si aucune modification ne se produisait dans la fonction cardiaque, l'excitation réflexe des centres vaso-moteurs pro-

duirait le resserrement vasculaire généralisé et avec lui une élévation de pression artérielle.

Mais si la même excitation provoque un ralentissement *considérable* du cœur, le système artériel recevant une quantité de sang très-minime dans un temps donné, la pression s'y abaissera forcément, tandis qu'elle s'élèvera dans les grands réservoirs veineux.

Si, au contraire, le cœur, quoique ralenti, continue à envoyer une quantité de sang suffisante dans les artères, le resserrement vasculaire réflexe sera efficace à produire l'élévation de la pression artérielle.

Cette condition fondamentale sera étudiée en détail dans un prochain travail; les données générales de la question sont seules indiquées ici.

On pouvait supposer que l'élévation de la pression artérielle observée dans les cas où le cœur n'est que modérément ralenti tient à un effort prolongé de l'animal, ou à une modification dans la proportion des gaz acide carbonique ou oxygène dissous ou combinés dans le sang; des expériences directes démontrent qu'il n'y a point à tenir compte de l'une ou l'autre de ces influences, dans les conditions où nous nous sommes placés.

VII.

INNERVATION DE L'APPAREIL MODÉRATEUR DU CŒUR CHEZ LA GRENOUILLE,

par le Dr JEAN de TARCHANOFF (de Saint-Pétersbourg).

PRÉAMBULE.

Le point de départ de ce travail est dans les faits que nous avons observés avec M. Puelma en pratiquant l'excitation alternative des deux pneumogastriques chez le chien (1).

Nous avons montré que, dans le cas où l'*excitation d'un pneumogastrique* a épuisé l'appareil modérateur du cœur, l'excitation, immédiatement portée sur l'autre nerf jusque-là en repos, reste sans effet sur les battements du cœur. Il suffit qu'il s'écoule une vingtaine de secondes entre l'excitation du premier pneumogastrique et celle du second pour que l'excitation de ce dernier suspende les pulsations cardiaques.

Nous avons conclu de ces résultats : 1° que les deux pneumogastriques aboutissent dans le cœur à un appareil modérateur commun, et que cet appareil ganglionnaire, une fois fatigué par l'excitation soutenue de l'un des nerfs afférents, ne peut répondre à l'excitation de l'autre ;

(1) *Archives de physiologie*, 1875.

2° qu'il suffit aux ganglions modérateurs d'un repos très-court pour recouvrer la faculté de réagir aux excitations.

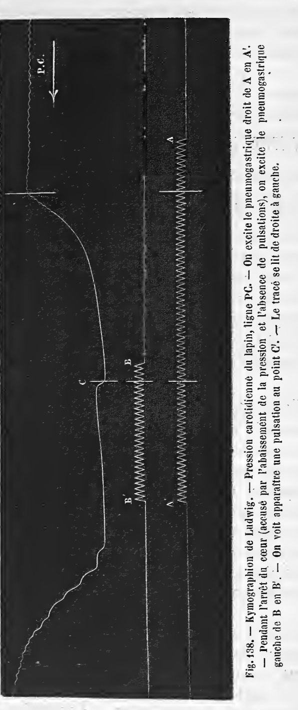


Fig. 138. — Kymographion de Ludwig. — Pression carotidienne du lapin, ligne PC. — On excite le pneumogastrique droit de A en A'. — Pendant l'arrêt du cœur (accusé par l'abaissement de la pression et l'absence de pulsations), on excite le pneumogastrique gauche de B en B'. — On voit apparaître une pulsation au point C'. — Le tracé se lit de droite à gauche.

J'ai poursuivi cet hiver à Saint-Pétersbourg ces faits dans leurs détails, et j'ai observé un phénomène très-curieux qui

m'oblige à modifier, ou tout ou moins à restreindre, l'explication que nous avions donnée, M. Puelma et moi, des effets produits par l'excitation alternative des deux pneumogastriques.

Je ne ferai que citer ici le fait dont il s'agit, réservant pour un autre travail les détails de ces recherches.

Si l'on produit l'arrêt du cœur, chez le lapin, par l'excitation d'un pneumogastrique, et que, *pendant cet arrêt*, on passe à l'excitation de l'autre nerf avec des courants induits de même force, tout en continuant à exciter le premier, *on provoque une pulsation du cœur*. La figure 138 montre le phénomène.

La pulsation C a été provoquée par l'excitation surajoutée du second pneumogastrique.

Ce fait (qui se rencontre particulièrement sur des lapins dont les deux pneumogastriques sont également excitables) conduit à penser qu'il peut se produire, dans l'appareil modérateur commun aux deux nerfs, une *interférence* des deux excitations portant à la fois sur les deux nerfs. L'activité d'un pneumogastrique peut ainsi mettre l'appareil modérateur du cœur dans des conditions telles que l'intervention du second pneumogastrique, bien loin de prolonger l'arrêt provoqué par le premier, l'interrompt par une pulsation.

C'est en raison de cette constatation nouvelle que nous devons attribuer aux faits antérieurement constatés avec M. Puelma une signification différente : ce n'est plus la *fatigue, l'épuisement* de l'appareil modérateur du cœur par l'excitation soutenue d'un pneumogastrique que nous devons invoquer pour rendre compte du défaut d'influence modératrice du second : il s'agit d'un état d'excitation, d'une activité suscitée dans cet appareil modérateur. — Cette phase active de l'appareil modérateur disparaît bientôt, et alors l'excitation du second pneumogastrique arrête franchement le cœur.

L'intérêt de ces faits nouveaux observés sur le cœur du chien et sur celui du lapin m'a engagé à rechercher si le cœur de la grenouille répondait de la même manière que celui des mammifères à l'excitation des deux pneumogastriques.

Ayant à ma disposition, grâce à la bienveillance du professeur Marey, les appareils explorateurs et enregistreurs si

précis et si simples employés au laboratoire du collége de France, j'ai pu faire une série d'observations qui me paraissent offrir un certain intérêt quand on les rapproche des faits indiqués précédemment.

PLAN.

Je grouperai de la façon suivante les faits principaux que je dois exposer dans cette note :

CHAPITRE I. — *A*. Comparaison de l'excitabilité des deux pneumogastriques chez la grenouille.

B. Effets de leur excitation *successive* (alternative).

C. Effets de leur excitation *simultanée*.

CHAPITRE II. — *A*. Variation des effets de l'excitation des pneumogastriques *suivant la phase* de la révolution cardiaque avec laquelle coïncide l'excitation, et retard de l'effet sur l'excitation.

B. Influence de l'intensité et du nombre des excitations.

CHAPITRE PREMIER.

A. Comparaison de l'excitabilité des deux pneumogastriques chez la grenouille (1).

Pour obtenir l'arrêt du cœur par l'excitation des pneumogastriques, la température du laboratoire étant de 20° à 23° cent., j'ai dû attendre 2 à 3 heures après la mise à nu des nerfs. Ce fait peut être dû à la fatigue de ces filaments dont l'isolement parfait est un peu long et minutieux. C'est après avoir attendu le retour complet de l'excitabilité des nerfs vagues que j'ai étudié comparativement l'influence du nerf droit et du nerf gauche sur le cœur.

Dans la plupart des cas, chez les grenouilles vertes, c'est le pneumogastrique droit qui l'emporte en activité sur le gauche, cette comparaison étant faite, bien entendu avec des excita-

(1) L'appareil explorateur du cœur dont je me suis servi est la pince myographique du cœur de la grenouille (Marey) décrite dans le présent volume (Mémoire II sur les excitations électriques du cœur. La pointe du levier inscrivait les battements du cœur à côté de la plume d'un signal électro-magnétique de M. Deprèz, qui indiquait la durée et le nombre des excitations.

Ces excitations étaient fournies soit par la bobine à glissière de Du Bois-Reymond, soit par une forte bobine Ruhmkorff.

L'appareil enregistreur était le cylindre de 0,42 c. de circonférence, mû par un mouvement d'horlogerie avec régulateur Foucault. Chaque seconde est représentée par 0,007 mm. du papier avec la vitesse de 0,42 par minute.

J'ai divisé le temps avec le diapason de 10 vibrations doubles transmises par l'air à un tambour à levier (Marey).

tions induites égales en intensité et en fréquence, sur les bouts périphériques des nerfs coupés à une hauteur égale.

Les deux tracés suivants (fig. 139 et 140) montrent bien que, dans ces conditions tout à fait semblables, le pneumogastrique gauche (fig. 139) ne produit qu'un effet très-peu marqué, tandis que l'arrêt du cœur est complet et prolongé avec le pneumogastrique droit.

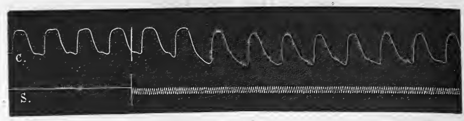


Fig. 139. — Excitation du pneumogastrique gauche (Bout périphérique).
C. Pulsations du cœur.
S. Signal des excitations induites.

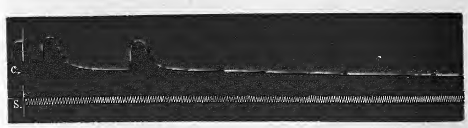


Fig. 140. — Excitation du pneumogastrique droit (Bout périphérique).
C. Pulsations du cœur.
S. Signal des excitations induites.

L'effet de l'excitation du pneumogastrique gauche s'accuse seulement par une ampleur plus grande des diastoles et un très-léger ralentissement du rhythme cardiaque.

Au contraire, les mêmes courants induits, appliqués au pneumogastrique droit, produisent un arrêt prolongé.

Toutes les grenouilles, il est vrai, ne présentent pas une différence aussi tranchée, mais cette différence se manifeste toujours dans le même sens : il est tout à fait exceptionnel de constater l'égalité des deux nerfs, et absolument rare de noter la supériorité du gauche sur le droit.

On voit donc qu'on retrouve sur la grenouille les différences déjà signalées par MM. Masouin en Belgique (1), Arloing et

(1) Masouin. *Bull. Acad., roy. de Belgique*, t. VI, 3e sér., no 4.

Fig. 141. — A. Excitation du pneumogastrique droit. B. Excitation du pneumogastrique gauche.

Tripier en France (1), à propos de l'inégalité d'action des pneumogastriques des mammifères ; la supériorité du nerf droit existe aussi chez les batraciens, quoique cette différence ait été contestée par MM. Legros et Onimus (2).

Nous croyons pouvoir conclure de ces observations que le *pneumogastrique droit tient sous sa dépendance une partie ou plus étendue ou plus importante de l'appareil ganglionnaire du cœur.*

B. *Effets de l'excitation alternative successive des deux pneumogastriques.*

Voulant pénétrer plus avant dans la recherche des rapports qui existent entre chaque pneumogastrique et l'appareil modérateur du cœur chez la grenouille, j'ai repris sur elle les expériences d'excitation alternative qui m'avaient déjà fourni d'intéressants résultats chez les mammifères.

J'ai vu alors que si l'on attend pour exciter le second pneumogastrique que le premier ait été épuisé par l'excitation, l'arrêt du cœur s'obtient de la façon la plus nette.

C'est ce qui ressort de l'examen des deux figures suivantes (141 et 142) dans lesquelles le temps écoulé entre l'excitation du premier pneumogastrique et celle du second a été de 1/2 seconde dans un cas, de 3 secondes dans l'autre.

(1) Arloing et Tripier, *Arch. Physiol.*, 1871-1872, p. 411 et 589.

(2) Legros et Onimus, *Journ. de l'Anat. et de la Phys.*, 1872, p. 561.

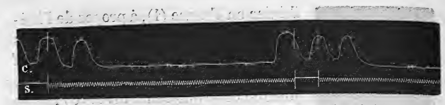


Fig. 142. — Excitations successives du pneumogastrique droit et du pneumogastrique gauche.



Fig. 143. — Ligne C. Pulsations du cœur de la grenouille, interrompues par l'excitation induite du pneumogastrique droit.
S. Signal électrique.

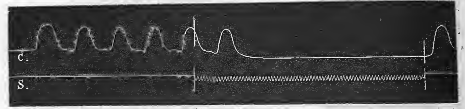


Fig. 144. — Ligne C. Pulsations du cœur de la grenouille suspendues par l'excitation induite du pneumogastrique gauche.
S. Signal électrique.

La différence des résultats obtenus par l'excitation successive des deux pneumogastriques, chez la grenouille et chez les mammifères, nous amène à considérer comme différent le mode de terminaison de ces nerfs dans l'appareil ganglionnaire cardiaque.

Les effets notés chez la grenouille peuvent être interprétés en admettant que chaque pneumogastrique aboutit à un département ganglionnaire indépendant ; dès lors, l'épuisement d'une série n'empêche pas la mise en jeu de l'autre série, quand on vient à exciter le pneumogastrique correspondant.

Des faits variés fournissent un certain appui à cette hypothèse, nous en rappellerons deux principaux :

a) Quand on excite l'un des pneumogastriques, le cœur s'arrête pour un certain temps ; mais, comme on sait, malgré la

persistance de l'excitation, les battements ne tardent pas à reparaître. Dans ces conditions, on peut faire intervenir, au moment même où vont reparaître les battements, l'excitation du pneumogastrique jusque-là en repos, l'arrêt du cœur se maintient, se prolonge par le fait de l'excitation du second pneumogastrique.

Dans les figures 143 et 144, on peut suivre cette série de faits : on voit dans la première de ces deux figures l'arrêt du cœur provoqué par l'excitation isolée du pneumogastrique droit ; dans la seconde cet arrêt est produit par l'excitation du pneumogastrique gauche. — La figure 145 montre l'addition de ces deux excitations opérées successivement : l'arrêt total est comme la somme des deux arrêts indépendants.

b) L'hypothèse que nous avons émise de la terminaison indépendante de chaque pneumogastrique dans l'appareil modérateur du cœur est évidemment inconciliable avec la possibilité d'une interférence entre les deux nerfs. C'est à l'idée de l'interférence que nous nous étions rattachés pour expliquer l'apparition d'une systole chez le lapin dont nous excitions simultanément, à un moment de l'expérience, les deux pneumogastriques. Mais cette idée implique la dépendance fonctionnelle des appareils terminaux des deux nerfs. Or, nous avons considéré comme nécessaire d'admettre la terminaison isolée chez la grenouille. De là, l'impossibilité de provoquer une systole par l'excitation d'un pneumogastrique survenant pendant que le

P.D. P.S. 1 2

Fig. 145. — Arrêt prolongé du cœur de la grenouille par l'excitation successive des deux pneumogastriques. De 1 à 2, excitation du pneumogastrique gauche ; de 2 à la fin, excitation du pneumogastrique droit : les deux effets s'ajoutent.

cœur est arrêté sous l'influence de l'excitation de l'autre.

Nous conclurons de ce simple exposé de nos recherches :

1° *Que la terminaison des pneumogastriques dans l'appareil modérateur du cœur de la grenouille diffère de leur terminaison dans l'appareil ganglionnaire du cœur des mammifères* (chien, lapin) ;

2° *Que chez les mammifères les deux nerfs aboutissent à un appareil modérateur commun, tandis que, chez la grenouille, chaque nerf aboutit à un appareil indépendant.*

CHAPITRE II.

A. *Variations des effets de l'excitation des pneumogastriques suivant la phase de la révolution cardiaque avec laquelle coïncide l'excitation.*

J'ai cherché à déterminer l'influence de la période pendant laquelle survenait l'excitation du pneumogastrique sur le moment d'apparition de l'arrêt du cœur. Cet arrêt, en effet, ne se produisait pas toujours au bout du même temps, et l'observation simple du phénomène devait conduire à rechercher d'une façon précise la part qui revenait dans ces variations au moment où était produite l'excitation du nerf d'arrêt.

On détermine tout d'abord l'excitation nécessaire pour arrêter le cœur à coup sûr. Cette excitation se compose de plusieurs courants induits dont on réduit le nombre à une limite minima en augmentant leur force. Avec cette valeur qui représente une donnée constante dans la question, on peut facilement saisir, dans une série d'expériences successives, un certain nombre d'instants dans la durée d'une révolution cardiaque de la grenouille, et, en superposant, comme l'a fait le professeur Marey pour les excitations directes du cœur, les résultats obtenus par les excitations du pneumogastrique, on obtient des tableaux dont la figure 146 représente un spécimen.

L'examen du tableau suivant montre que la phase pendant laquelle le retard est réduit à sa valeur minima correspond à la fin de la diastole et au début de la systole; j'appellerai cette période, période *diastolo-systolique*. A mesure qu'on s'en écarte

soit en remontant vers le début de la diastole, soit en suivant la systole elle-même, le moment d'apparition de l'arrêt du cœur est retardé dans des limites évidemment variables, que la série des tracés suivants peut servir à préciser d'une

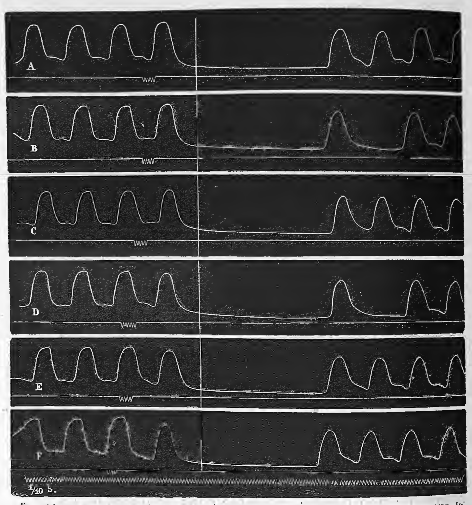


Fig. 146. — Série de tracés dans lesquels on peut suivre l'allongement du retard entre le moment de l'excitation du pneumogastrique et le moment d'apparition de l'arrêt du cœur. Une ligne verticale indique le moment où commence l'arrêt : on voit qu'un temps variable s'écoule entre les deux instants indiqués dans les tracés superposés.

Ligne inférieure. Vibrations marquant le 1/10 de seconde (1).

manière générale : le sens des phénomènes se montre toujours le même, mais les valeurs réelles des variations du retard ne peuvent être appréciées que pour chaque cas particulier.

Un fait dont l'importance est mise hors de doute par sa reproduction constante, c'est que, même dans le cas où le re-

(1) Pour construire ce tableau on superpose sur la même ligne verticale tous les instants où devrait apparaître la première pulsation supprimée.

tard de l'arrêt est réduit au minimum par l'excitation dans la phase diastolo-systolique, *une pulsation* a toujours lieu entre le moment de l'excitation et le moment de l'arrêt. Cette *pulsation constante* ne peut être supprimée même par les excitations les plus fortes.

De cette remarque peut se déduire l'opinion qu'il se forme dans l'appareil ganglionnaire du cœur une sorte de charge nerveuse motrice, pendant la période diastolo-systolique, pour la pulsation suivante. Si l'on intervient avec l'excitation du pneumogastrique ou de la moelle allongée pendant cette période même, on ne peut agir que sur les pulsations consécutives à la pulsation nécessaire, constante.

L'analyse des effets variables produits par l'excitation des pneumogastriques suivant la période avec laquelle coïncide cette excitation peut se poursuivre chez les mammifères : le professeur Donders a obtenu, en excitant le pneumogastrique du lapin à différents instants de la révolution cardiaque, des tracés fort démonstratifs à cet égard : la feuille sur laquelle sont inscrits, avec les signaux d'excitation et les pulsations du cœur du lapin, les secousses induites par les systoles dans une patte galvanoscopique, m'a été confiée par le professeur Marey, et j'ai pu m'assurer que c'était bien encore pendant la phase *diastolo-systolique* que l'excitation du nerf pneumogastrique se montrait le plus rapidement efficace (1).

Des expériences analogues avaient été faites au laboratoire du professeur Marey, et je tiens de mon ami, le Dr François-Franck, la série de tracés que je reproduis ici comme démontrant eux aussi que l'excitation du pneumogastrique, faite chez le lapin, pendant la période *diatolo-systolique* est plus rapidement suivie de l'arrêt du cœur que l'excitation faite à tel ou tel autre moment.

Quand, au lieu d'exciter pendant cette phase sensible (A), on a excité en pleine systole (B), par exemple l'arrêt s'est

(1) Je ne connais du travail du professeur Donders que cette feuille qui était entre les mains de M. Marey : le compte rendu des recherches de l'auteur ne s'est point trouvé, à mon grand regret, dans les bibliothèques qui étaient à ma disposition : j'ignore donc quel parti M. Donders a pu tirer de ses expériences, et ne puis que mentionner les faits qui m'ont paru ressortir de l'examen de ses tracés.

montré plus tardif : cette augmentation du « *temps perdu* » a sensiblement pour mesure la durée d'une pulsation.

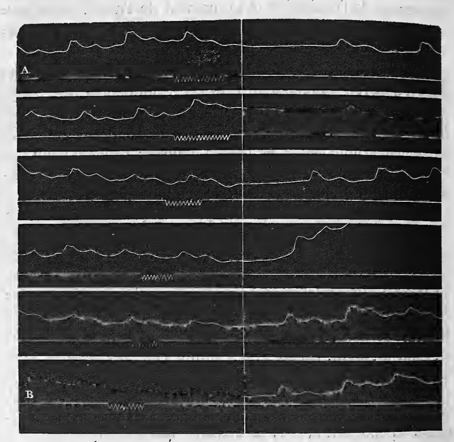


Fig. 147.— Excitations induites du nerf pneumogastrique droit chez le lapin, faites à des instants différents de la révolution cardiaque. — Variations du retard de l'arrêt du cœur. — Retard minimum quand l'excitation tombe pendant la phase diastolo-systolique.

On sait bien que la mise en jeu de la fonction d'arrêt des nerfs vagues trouve des résistances dans le cœur.

Mais ce que les recherches précédentes nous permettent d'ajouter, c'est que ces résistances à l'action d'arrêt ne sont pas régulièrement réparties entre les différentes phases de la révolution cardiaque.

L'impulsion nerveuse qui doit provoquer une systole s'accumule dans l'appareil ganglionnaire précisément pendant cette période diastolo-systolique : c'est dans cette phase que les excitations des pneumogastriques doivent rencontrer la plus grande somme de résistances à la manifestation de leurs effets.

B. *Influences de l'intensité et du nombre des excitations.*

Pour me faire une idée de la force des résistances opposées à la mise en jeu des pneumogastriques par l'appareil excito-moteur du cœur, j'ai voulu savoir si l'on peut arrêter le cœur des grenouilles et des mammifères avec une décharge induite de rupture, unique et très-intense.

J'employai dans ce but la grosse bobine de Ruhmkorff qui, avec le courant de 6 éléments Bunsen, donne des étincelles de 3 ou 4 millimètres de longueur.

Jamais je n'ai pu obtenir d'arrêt du cœur, avec cette secousse unique (fig. 148), ni sur les grenouilles, ni sur les lapins : sur les premières, je n'ai observé qu'un faible ralentissement des battements. Si, au contraire, on excite le pneumogastrique de la grenouille avec plusieurs décharges d'induction, quelquefois seulement deux ou trois, on obtient nettement l'arrêt. Il est donc nécessaire d'exciter le nerf avec une série de décharges d'induction pour vaincre les résistances opposées à l'action du pneumogastrique.

Nous connaissions, par les travaux de Donders, la propriété que présente l'appareil terminal des pneumogastriques d'additionner une série d'excitations dont chacune est insuffisante à produire l'arrêt.

Legros et Onimus se sont attachés à démontrer l'influence croissante des excitations des pneumogastriques à mesure que la fréquence des interruptions augmente.

J'ai pu m'assurer de la valeur de cette condition dans une expérience faite avec Franck et dans laquelle nous n'avons obtenu aucune modification des battements du cœur en excitant le bout périphérique du pneumogastrique du lapin avec des coups d'induction isolés : cependant l'intensité de chaque excitation était considérable (grosse bobine Ruhmkorff, 6 éléments Bunsen).

Quand ensuite nous avons fait passer dans le même nerf, au-dessous des points primitivement excités, une série de secousses d'induction beaucoup moins énergiques (petite bobine Du Bois-Reymond, 4 Daniell), nous avons obtenu un arrêt presque complet.

Les tracés suivants présentent les résultats que je viens



Fig. 148. — Excitation du bout périphérique du pneumogastrique de la grenouille avec une décharge unique, pas d'arrêt du cœur; arrêt avec une série de secousses. (C pulsations du cœur. — S signaux des excitations.)

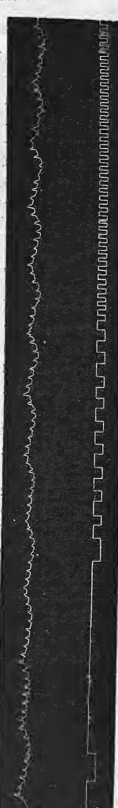


Fig. 149. — Excitation du bout périphérique du pneumogastrique du lapin avec des décharges isolées de la bobine Ruhmkorff.

d'indiquer : la figure 149 se rapporte à l'excitation du pneumogastrique avec des décharges d'induction isolées ; la figure 150 à l'excitation avec une série de secousses beaucoup moins intenses.

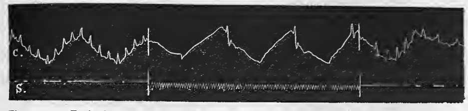
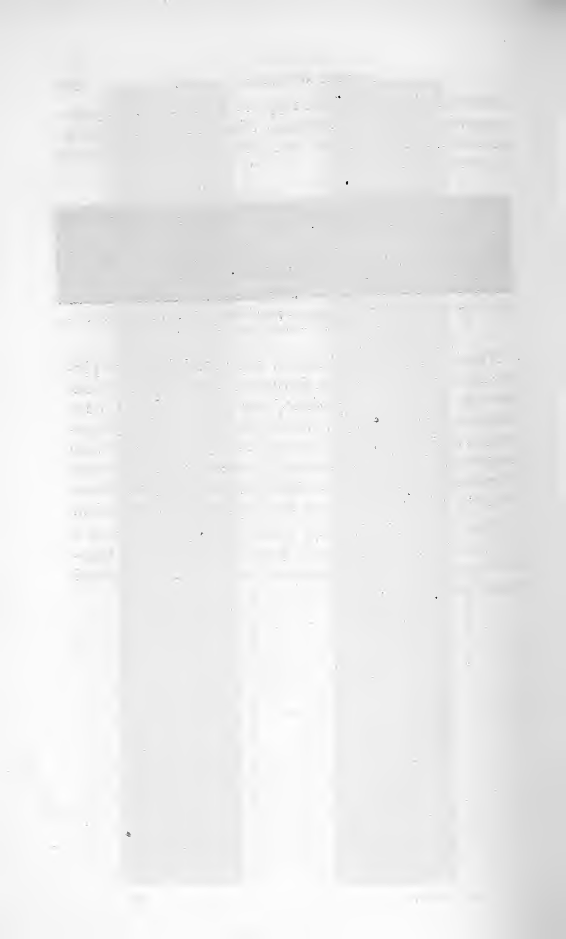


Fig. 150. — Excitations du même pneumogastrique, un peu plus bas, avec une série de secousses induites peu intenses (Bobine Du Bois).

D'après ces résultats, l'arrêt du cœur serait beaucoup plutôt sous la dépendance de la *durée* que de *l'intensité* des excitations du nerf pneumogastrique ; une seule décharge de la bobine de Ruhmkorff vaut, en intensité, des centaines de décharges de la petite bobine Du Bois, mais cette forte secousse ne dure que quelques centièmes de seconde ; en diminuant la force de l'excitation et en augmentant sa durée, on obtient des effets qui paraissent tout à fait légitimer notre conclusion.

Je ne terminerai point cette courte note, sans exprimer à M. le professeur Marey et à son préparateur, mon ami François-Franck, ma vive reconnaissance pour l'aimable accueil qui m'a été fait dans le laboratoire.



VIII.

PRESSION ET VITESSE DU SANG.

par E.-J. MAREY.

(SUITE (1).)

La première partie de ce mémoire avait pour but de montrer la nécessité qui s'impose au physiologiste de ne point séparer l'étude de la pression du sang de celle de la vitesse de son mouvement. Ces deux notions, en effet, sont nécessaires pour caractériser l'état de la circulation du sang chez un animal. Du reste, les faits expérimentaux nombreux énumérés dans ce premier travail tendaient à identifier les phénomènes de la circulation artérielle avec ce qui se passe dans les conduits où circule un liquide.

Toutes les variations que peut offrir la circulation vasculaire tiennent à des changements survenus, soit dans dans la force impulsive du cœur, soit dans la résistance que les petits vaisseaux présentent au passage du sang. Or il devient facile de faire la part de chacune de ces deux influences du moment où l'on connaît la pression et la vitesse du sang dans un vaisseau artériel.

On a vu en outre, dans ce premier travail, que les variations de la pression et de la vitesse du sang artériel sous l'influence de l'action cardiaque ont beaucoup d'intensité quand

(1) Voir le premier volume 1875, p. 337.

la pression artérielle est faible, tandis qu'elles sont très-peu intenses quand la pression artérielle est forte.

Ce fait est très-important, car il fournit un moyen indirect de connaître l'état de la pression artérielle chez l'homme. Il révèle entre l'état de la pression vasculaire et l'activité de la fonction cardiaque une solidarité qu'il importe de bien définir.

L'objet des chapitres prochains est de chercher la valeur absolue de la pression du sang chez l'homme, après quoi on essayera de bien ***déterminer l'influence réciproque de la pression artérielle sur le travail du cœur et du travail du cœur sur la pression artérielle.***

On peut comparer ces relations à celles qui existent entre la pression de l'eau dans une pompe en action et celle qui existe dans les conduits où cette pompe envoie le liquide. Le raisonnement tout seul permettrait d'émettre certaines prévisions. Ainsi on pourrait prévoir l'analogie qui existe nécessairement entre les maxima de pression dans la pompe et dans le conduit, la différence qui existe entre les minima de la pression dans ces deux organes, grâce à l'indépendance qu'établit entre eux la clôture de la soupape au moment où la pompe se remplit, etc. Bien que ces raisonnements conduisent à comprendre assez clairement le jeu de la circulation ventriculo-aortique, ils seraient toutefois bien insuffisants pour éclairer le mécanisme merveilleusement délicat de cette pompe vivante. Aussi, est-ce à l'expérimentation que nous devrons recourir pour obtenir à cet égard des notions précises.

Mesure manométrique de la pression du sang dans les artères de l'homme.

Importance d'une pareille mesure, au point de vue physiologique et médical, si elle pouvait être obtenue sans mutilation. — On peut mesurer la pression intérieure que supporte un tube ou une ampoule en communication avec le sang artériel en faisant agir une contre-pression extérieure que l'on mesure. Expérience du sphygmoscope. — Appareil servant à placer la main et l'avant-bras dans l'air comprimé; mesure de la pression du sang sur l'homme. — Immersion de la main dans de l'eau sous pression; inscription des changements de la pulsation.

Dans un des mémoires contenus dans ce volume (1) j'ai dit comment, à travers les tissus vivants, on peut apprécier les changements rhythmés de la pression cardiaque ou artérielle. Mais ce n'est là qu'une mesure relative, annonçant que la pression s'élève ou s'abaisse plus ou moins vite et que ses variations ont plus ou moins de durée; serait-il possible d'avoir, sur l'homme vivant, la mesure absolue de la pression du sang, telle que le manomètre la donne sur les animaux?

On trouve dans la science des exemples d'application du manomètre aux artères humaines, mais ces cas sont fort rares et ne peuvent passer que pour de stériles satisfactions de la curiosité des expérimentateurs, tandis que si l'on trouvait un procédé simple et pratique de mesurer la pression du sang chez l'homme, on rendrait un véritable service non-seulement à la physiologie, mais à la médecine. Je ne veux pour preuve de cette dernière assertion que l'ardeur que certains médecins ont mise à rechercher un sphygmographe qui marquât la valeur absolue de la pression artérielle.

Je crois avoir surabondamment démontré que cette recherche est vaine, attendu que la force avec laquelle une artère

(1) La méthode graphique, chap. X.

doit être comprimée pour que la pression du sang qu'elle renferme soit vaincue par une contre-pression extérieure, cette force, dis-je, varie suivant le diamètre du vaisseau. Or comme ce diamètre change suivant certaines influences physiologiques, et comme d'autre part, les variétés anatomiques du calibre des artères sont très-nombreuses, il est impossible de réaliser le sphygmographe idéal qui mesurerait la pression absolue du sang artériel.

Mais si, au lieu de comprimer un vaisseau sur une de ses faces, on plongeait ce vaisseau dans un milieu comprimé à une pression qu'on pût graduer, il est clair qu'en élevant peu à peu la pression du milieu ambiant, on arriverait à un moment où la pression intérieure serait vaincue. Le moment où se produirait l'affaissement du vaisseau signalerait l'instant où la pression ambiante, mesurable au manomètre, arriverait à dépasser la pression intra-artérielle.

Ce procédé de mesurer une pression intérieure par une contre-pression extérieure peut être appliqué à un organe vivant qu'on plonge dans le milieu comprimé. En élevant graduellement la contre-pression pendant qu'on la mesure avec un manomètre, on voit, à un instant donné, que le membre ainsi comprimé extérieurement devient pâle et diminue notablement de volume; c'est qu'alors la pression du sang artériel est surmontée et que le sang ne peut plus pénétrer dans l'organe exploré.

La contre-pression dont le manomètre indique en ce moment la mesure est sensiblement égale à la pression artérielle.

Pour rendre plus facilement intelligible le mode de mensuration dont je me suis servi, l'expérience suivante me semble une préparation utile.

Prenons un sphygmoscope, appareil dont la description a été donnée précédemment (1), et mettons-le en communication avec une artère du schéma de la circulation. Nous verrons son ampoule s'emplir, puis rester tendue en permanence en présentant de très-légers mouvements de gonflement et de resserrement suivant que la pression intérieure s'élève ou s'abaisse. Dans ces conditions, la pression du liquide se met in-

(1) La méthode graphique, chap. XI, p. 197.

cessamment en équilibre avec la force élastique des parois de l'ampoule de caoutchouc de très-petits changements de volume de cette ampoule suffisent à faire varier la force élastique de ses parois assez pour contre-balancer les différents degrés de la pression du liquide intérieur.

Remplissons d'eau la cavité du manchon de verre qui entoure l'ampoule de l'appareil et le tube de transmission; enfin adaptons celui-ci à un manomètre également plein d'eau. Nous constaterons que ce manomètre exécute de très-faibles mouvements, parce que la pression du sang ne lui arrive que très-partiellement, étant pour la plus grande partie contre-balancée par l'élasticité de l'ampoule de caoutchouc.

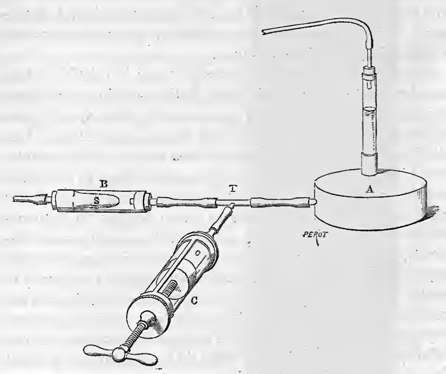


Fig. 151. — Disposition pour mesurer la pression à l'intérieur de l'ampoule S, d'après la contre-pression développée à sa surface extérieure.

Le tube T porte un branchement qui le relie à une seringue à vis remplie d'eau. Poussons une certaine quantité d'eau dans l'espace qui communique avec le manomètre, cet instrument indiquera un niveau de pression plus élevé; en même temps on verra ses oscillations devenir plus étendues. C'est que l'ampoule S a diminué de volume, et que la force

élastique de ses parois moins tendues contre-balance moins complétement la pression du liquide qui joue le rôle de sang; une plus grande partie de cette pression et des variations qu'elle subit sera donc supportée par le manomètre qui en traduira moins incomplétement les variations rhythmées.

Continuons à pousser du liquide dans le tube T; le manomètre montera encore, les pulsations augmenteront d'amplitude, et l'on verra l'ampoule S diminuer de volume; ses parois deviendront plus souples et n'offriront plus à un moment donné aucune résistance à la pression sanguine qui se fera sentir tout entière sur le manomètre, comme si l'ampoule n'existait pas, car alors les parois de celle-ci flottent librement d'un côté à l'autre au gré du mouvement du liquide. A ce moment, le manomètre indique exactement la pression du sang et les variations qu'elle éprouve.

Poussons encore un peu de liquide dans le tube T, le manomètre monte encore, mais les oscillations diminuent; chaque fois que la pression du sang présente des minima, les parois de l'ampoule s'adossent et obturent le tube, de sorte que l'oscillation manométrique est arrêtée dans sa phase descendante. Sous l'influence d'une pression plus grande dans le tube T, la pression artérielle est presque complétement vaincue; les maxima seuls ébranlent encore un peu la colonne du manomètre. Encore un faible excès de pression, et tout mouvement disparaît dans la colonne manométrique; celle-ci marque en permanence une pression supérieure à celle du sang. La figure 152 montre la série des phases du phénomène, la période d'accroissement de l'amplitude de la pulsation, période qui correspond à la moindre distension des parois vasculaires, puis l'affaiblissement final et l'extinction de la pulsation au moment où la pression artérielle du schéma est surmontée; la pression extérieure à l'ampoule atteignait alors 9 centimètres.

Rien n'est plus facile que de saisir de cette manière la valeur de la pression, non-seulement dans le liquide du schéma, mais dans le sang artériel d'un animal auquel on appliquerait un sphygmoscope dans les conditions ci-dessus indiquées.

Or, si l'on se reporte aux expériences décrites dans le mémoire de M. François-Franck relatif aux changements du

volume de la main, on remarquera que l'appareil employé dans ces expériences est un véritable sphygmoscope, dans lequel la main, avec ses turgescences et ses resserrements alternatifs, joue le rôle de l'ampoule 151, figure S. Mettons cet appareil plein d'eau en communication avec un manomètre anéroïde, et élevons graduellement la pression dans le liquide de l'appareil, nous assisterons à toutes les phases du phénomène que nous décrivions tout à l'heure, et, à un moment donné, nous verrons toute pulsation disparaître. C'est que les vaisseaux sanguins, écrasés par la contre-pression, ne reçoivent plus le sang artériel dont la pression est vaincue.

L'appareil en usage pour étudier les changements de volume des organes ne conviendrait pas pour l'expérience en question. Le liquide devrait être comprimé dans le manchon où le bras est plongé à une pression de 16 à 17 centimètres de mercure, parfois même à une pression plus forte, pour vaincre la pression du sang dans les artères; or le collier de caoutchouc qui ferme autour du bras le col de l'appareil céderait à la pression de l'eau bien avant d'atteindre cette limite.

Un appareil que j'ai fait construire, il y a vingt ans déjà, m'a servi merveilleusement pour réaliser la mesure de la pression artérielle. C'est une caisse mé-

Fig. 153. — Inscription manométrique des changements de volume de l'ampoule d'un sphygmoscope soumise à des pressions extérieures variant de zéro à centimètres de mercure.

tallique rectangulaire, munie à l'une de ses extrémités d'une sorte de goulot dans lequel on enfonce le bras. Une glace placée à la face supérieure de la caisse permet de voir ce qui se passe à l'intérieur.

Le pourtour du goulot par lequel on passe le bras est muni d'une véritable soupape autoclave. C'est un manchon de caoutchouc conique invaginé dans l'intérieur de la caisse. Ce manchon étreint légèrement l'avant-bras et s'applique contre lui d'une manière hermétique. Comme, sous l'influence de la pression intérieure, le manchon de caoutchouc pourrait se distendre et faire hernie, un second manchon, fait de taffetas de soie et présentant à la fois la minceur et l'inextensibilité, est placé par-dessus le manchon de caoutchouc. On invagine à la fois ces deux manchons dans l'intérieur de la caisse; la soie recouvre l'avant-bras, sauf à l'extrémité du double manchon où le caoutchouc se prolonge plus loin qu'elle, afin de s'appliquer bien hermétiquement sur la peau. La figure 153 donne une idée de la superposition de ces deux feuilles successives dont l'une, le caoutchouc, assure l'herméticité, et l'autre, le taffetas, la solidité de l'occlusion. Quand on comprime de l'air, par exemple, à l'intérieur de cet appareil, on voit le taffetas se tendre et former un bourrelet arrondi et fort dur tout autour de l'avant-bras qu'il étreint.

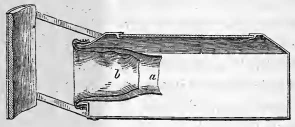


Fig. 154. — Coupe de l'appareil destiné à comprimer la main et l'avant-bras, *a*. — Manchon de caoutchouc invaginé dans la caisse, *b*. — Manchon de taffetas supprimant l'extensibilité du 1er manchon. Une pièce retenue par des courroies empêche le bras de céder à la pression intérieure.

Ce n'est pas tout : une pression assez considérable exercée à l'intérieur de cette caisse métallique constitue une poussée considérable contre l'avant-bras et le manchon qui l'entoure; cette poussée chasserait l'avant-bras sans que la force d'un homme ordinaire pût lui résister. Je m'oppose à cette tendance au recul de l'avant-bras, en plaçant derrière le coude une

gouttière métallique rembourrée confortablement. Cette gouttière est maintenue par quatre liens solides qui, d'autre part, s'attachent sur les côtés du goulot de la caisse.

Cette gouttière forme un appui solide qui résiste à la poussée de l'air et permet à l'expérimentateur de résister sans le moindre effort à une pression équivalente à 30 ou 40 kilogrammes.

Enfin, des tubes munis de robinets mettent l'intérieur de la caisse en communication avec la source de pression et avec le manomètre chargé de la mesurer.

Dans mes premières expériences, je recourais à l'emploi de de l'air comprimé : au moyen d'une petite pompe foulante, on comprimait de l'air dans l'appareil, tandis qu'un manomètre appliqué à l'un des tubes à robinet indiquait la pression exercée sur la main.

Au bout de quelques instants, on voyait la main pâlir d'une manière graduelle et devenir bientôt d'une pâleur cadavérique ; à ce moment, l'afflux du sang artériel était empêché.

Si l'on diminue légèrement la pression, le sang rentre de nouveau dans les tissus et la main rougit vivement ; sa coloration est même plus vive qu'avant la compression. En même temps, le patient éprouve une sensation de chaleur qui se répand avec le sang d'une manière soudaine.

L'écart qui sépare les deux pressions, dont l'une chasse le sang des tissus tandis que l'autre en permet la rentrée, est peu considérable; il n'excède pas, en général, un centimètre de mercure. On peut donc, avec une approximation assez satisfaisante, évaluer la pression absolue du sang dans les artères de l'homme.

C'est à ce genre d'expériences que je m'étais arrêté jusqu'ici, et je montrais dans mes cours qu'une pression de 12 à 16 centimètres de mercure est le plus souvent suffisante pour surmonter la pression du sang dans les artères.

Cet appareil me servait aussi concurremment avec le sphygmographe pour montrer les changements qui se produisent dans la pression artérielle au moment d'un effort.

L'emploi du sphygmographe montre à quel point la pression s'élève dans la radiale sous l'influence d'un effort d'expiration,

la glotte fermée ; voici ce que montre l'emploi de la caisse à air comprimé :

Quand la pression de l'air à l'intérieur du réservoir a atteint le degré voulu pour vaincre la pression intra-artérielle et quand la main est devenue exsangue et affaissée, il suffit de faire un effort d'expiration capable de soulever deux ou trois centimètres de mercure pour sentir un flot de sang chaud qui envahit la main ; la pression artérielle a donc été relevée par cet effort ; mais cette élévation est peu durable: au bout de 3 ou 4 pulsations du cœur, on voit la main pâlir de nouveau. (Nous donnerons plus tard l'explication de ce phénomène.)

Réciproquement, quand la pression extérieure n'est pas tout à fait assez forte pour vaincre celle du sang dans les artères, on peut par un effort d'inspiration produire instantanément la pâleur de la main.

La pression sanguine, légèrement abaissée, est alors vaincue par la pression de l'air extérieur.

Dans toutes ces expériences, c'est de l'air qui comprime les tissus renfermés dans la caisse ; ce procédé a certains avantages, il altère peu la température des tissus et permet de faire à cet égard des études intéressantes ; mais il nous prive d'un élément important dans l'étude de la circulation, je veux parler des pulsations artérielles qui, absorbées dans l'élasticité de l'air que l'on comprime, n'arrivent pas au manomètre; ce dernier ne signale donc que la pression nécessaire pour vaincre les maxima de la pression du sang artériel.

Si nous introduisons de l'eau tiède au lieu d'air à l'intérieur de la caisse, nous obtiendrons exactement la série des phénomènes précédemment cités à propos de l'emploi du sphygmoscope :

C'est-à-dire qu'un manomètre métallique inscripteur, mis en communication par un tube large, plein de liquide, avec la caisse où le bras est plongé, donne de très-faibles pulsations tant que le liquide reste sous la pression normale, parce qu'alors les vaisseaux distendus ont une force élastique considérable qui, avec très-peu de changements de calibre, résiste aux variations rhythmiques de la pression du sang.

Si au moyen d'un long tube on met en communication, avec la caisse où la main est renfermée, un vase plein d'eau et si,



à l'aide d'une corde et d'une poulie, on élève graduellement ce vase, à mesure que la pression monte dans la caisse, les pulsations vont en grandissant. Cela montre que les artères moins distendues ont moins de force élastique, et qu'une plus grande partie de la pression arrive au manomètre. En continuant ainsi à élever la pression, il arrive un instant où les pulsations cessent après avoir subi une phase décroissante. Les choses se passent donc absolument comme avec le sphygmoscope. Quant à la valeur de la pression qui fait équilibre à celle du sang, elle variait, dans mes dernières expériences, de 12 à 17 centimètres de mercure.

La figure 154 montre, dans son ensemble, la disposition de l'expérience. L'avant-bras est plongé dans la caisse que nous connaissons déjà; celle-ci, au moyen d'un tube *t*, communique avec une boule pleine d'eau R formant réservoir et source de pression. Cette boule peut monter ou descendre au gré de l'expérimentateur qui

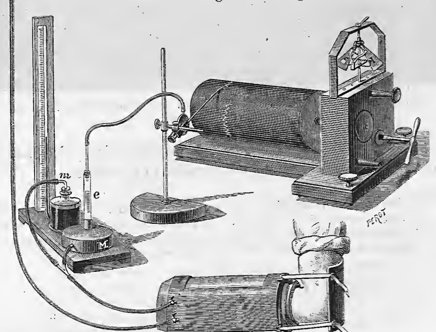


Fig. 155. — Disposition de l'expérience pour inscrire la pression dans les vaisseaux de la main

n'a besoin pour cela que de tirer sur la corde *c* qui passe sur une poulie suspendue au plafond.

Un manomètre élastique M (1), en communication avec l'intérieur de la caisse, signale les élévations de pression qui s'y produisent. Enfin un tambour à levier écrit sur un cylindre les pulsations totalisées des organes immergés, en exprimant, à la fois, l'amplitude de ces mouvements et le degré de pression sous lequel ils se produisent (2).

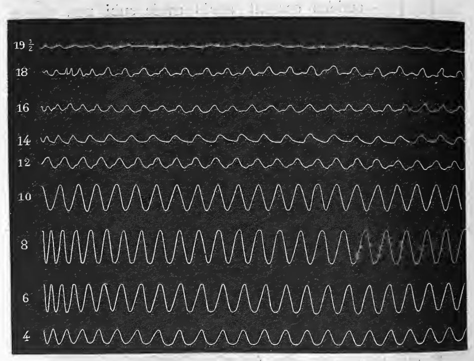


Fig. 156. — Changements du volume de la main; leurs variations sous l'influence de pressions croissantes.

La figure 155 montre une série de tracés des pulsations de la main, recueillies sous des pressions croissantes.

(1) Voir, pour la description de ce manomètre, p. 200.

(2) Pour contrôler l'indication du manomètre inscripteur, an point de vue de la valeur absolue de la pression, il est parfois avantageux de mettre aussi un manomètre à mercure en communication avec la caisse.

V. — Rapports de la pression ventriculaire gauche avec la pression artérielle.

Expériences anciennes sur ce sujet ; expériences faites avec le concours de Chauveau. — Expériences contradictoires de Fick, réfutation. — Mémoire de Gradle, nouvelle réfutation ; expériences sur le schéma. — La pression ventriculaire gauche est toujours supérieure à celle de l'aorte. — Analyse des tracés ; moment où s'ouvrent les valvules sigmoïdes ; ce moment varie avec la pression artérielle et avec la force du cœur. — Vérification sur le schéma.

A. *La pression aortique ne saurait excéder les maxima de la pression dans le ventricule gauche.*

Ce qu'on a vu dans le mémoire V, relativement aux erreurs provenant de l'emploi de certains manomètres, montre qu'on ne peut guère accorder de confiance aux mesures faites avec les instruments à mercure. C'est pour cette raison que Chauveau et moi, nous avons entrepris, il y a une quinzaine d'années, une série d'expériences sur les mesures de la pression dans les différentes cavités du cœur et en particulier dans le ventricule gauche et dans l'aorte. Le procédé consistait à faire passer une sonde cardiaque de l'aorte dans le ventricule ou réciproquement. On inscrivait ainsi la courbe des pressions ventriculaire et aortique à côté l'une de l'autre, et l'œil estimait aisément la hauteur relative des maxima et des minima de chacune d'elles (1).

La figure 156, reproduite d'après ces expériences qui datent

(1) La mesure des valeurs absolues est beaucoup moins importante, nous ne nous en occupons pas ici ; elle s'obtenait en soumettant les sondes à des pressions connues, et en cherchant quels écarts de pression étaient nécessaires pour obtenir des excursions du levier inscripteur semblables à celles que donnait l'expérience faite sur un animal vivant. (Voyez *Physiol. méd. de la circul. du sang*, p. 101.)

d'une quinzaine d'années, montre fort bien la valeur relative de la pression dans le ventricule gauche et dans l'aorte à tout

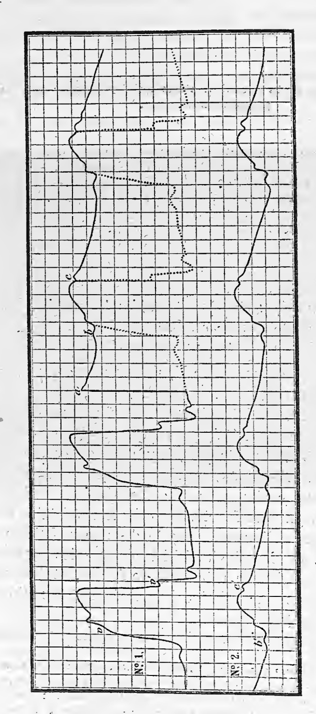


Fig. 153. — 1. Courbes de la pression dans le ventricule gauche. — 2. Courbes de la pression aortique ou pouls de l'aorte ; au milieu de la figne 1, la sonde qui était plongée dans le ventricule gauche est retirée dans l'aorte, le tracé ventriculaire se change en tracé aortique. Une courbe ponctuée représentant les phases de la pression du sang dans le ventricule est tracée dans la seconde moitié de la ligne 1, pour montrer à quels instants la pression ventriculaire diffère de celle de l'aorte, et à quel moment ces deux pressions se rapprochent l'une de l'autre.

instant de chaque révolution cardiaque. Nous reviendrons sur l'analyse de cette figure ; c'est le meilleur moyen de bien faire

saisir les rapports nécessaires entre ces deux pressions dont l'une représente la puissance et l'autre la résistance dans le mécanisme de la circulation ventriculo-aortique.

Deux sondes cardiaques de même sensibilité étaient plongées l'une dans le ventricule gauche (elle avait passé par la carotide et l'aorte), et l'autre dans l'aorte. La première donnait le tracé n° 1, la seconde le tracé n° 2 que j'ai souvent désigné sous le nom de pouls aortique. Vers le milieu de l'expérience, on retire la sonde ventriculaire ; on voit alors la pression s'élever soudainement en *a*, ce qui provient de ce que d'un ventricule relâché, où la pression est presque nulle, la sonde passe dans l'aorte, où le sang retenu par les valvules sigmoïdes garde une pression élevée qui ne décroît que lentement par l'écoulement du sang artériel à travers les petits vaisseaux.

La pression aortique se relève au moment *b* jusqu'en *c*, par suite d'une nouvelle arrivée de sang du ventricule. Une courbe ponctuée, rappelant les différentes variations de la pression du ventricule gauche, montre que la pression est sensiblement la même dans le ventricule et dans l'aorte pendant les maxima de l'effort systolique du ventricule, tandis que la pression, dans ces deux cavités, diffère beaucoup pendant la phase diastolique du ventricule.

Cette différence et cette ressemblance alternatives entre les pressions cardiaque et artérielle s'expliquent, avons-nous dit, parce que l'aorte et le ventricule sont tantôt en large communication, tantôt entièrement séparés l'un de l'autre par les valvules sigmoïdes. C'est ainsi que, dans le cylindre d'une pompe, la pression peut être très-fortement négative pendant que le cylindre s'emplit, tandis que le conduit qui en émane garde toujours une pression positive, grâce à la soupape qui le ferme à ce moment. Dans l'instant où la pompe chasse le liquide dans le tube, la pression est positive aussi bien dans le cylindre que dans le tuyau, parce que ces cavités sont en large communication l'une avec l'autre.

Enfin, si l'on compare avec plus de rigueur le niveau de la pression cardiaque et celui de la pression aortique au moment où ces deux cavités communiquent entre elles, on constate que toujours la pression artérielle est plus ou moins inférieure à celle du ventricule. C'est une condition nécessaire pour que le

sang passe du cœur dans les vaisseaux, car c'est une loi générale, que les liquides se meuvent toujours d'une pression plus forte vers une pression plus faible.

Or, il s'est élevé sur ce point une contradiction singulière que j'ai déjà signalée l'an dernier, mais que j'ai combattue sans doute d'une manière trop peu explicite, puisqu'elle s'est reproduite de nouveau. Le professeur Fick, de Wurtzburg, reprenant au moyen de son *federkymographion* les expériences de cardiographie que j'ai faites avec Chauveau, a constaté que la pression du sang artériel dépassait la pression ventriculaire, surtout dans les cas où les battements du cœur étaient accélérés. Très-surpris de ce résultat qui lui semblait paradoxal, Fick supposa qu'il tenait peut-être à la grande vitesse de l'ondée ventriculaire et à une sorte de *coup de bélier* qui se produisait dans le système artériel. Cette explication n'a du reste été donnée par l'éminent physiologiste qu'avec toutes sortes de réserves et ne semblait pas le satisfaire d'une manière complète.

A ces expériences j'ai répondu en accusant le *federkymographion* de ne pas obéir assez vite aux pressions qui agissent sur lui et de se comporter un peu à la manière du *manomètre compensateur* (1) qui ne donne que de très-petites excursions oscillant autour de la pression moyenne dont il n'indique ni les maxima ni les minima véritables.

Je n'ai aucun motif de croire que le professeur Fick n'ait pas accepté l'interprétation que je proposais, mais cette interprétation n'a pas été admise par le Dr Gradle qui, dans le laboratoire du professeur Stricker, a repris les expériences de Fick avec les mêmes résultats et adopté sans réserve la théorie du *coup de bélier*. En présence de ce malentendu persistant, il devient nécessaire de reprendre entièrement la discussion, en mettant sous les yeux du lecteur les résultats obtenus par Fick et en montrant qu'on en obtient de semblablement erronés toutes les fois qu'on se sert d'un manomètre dont les mouvements ne sont pas assez rapides pour suivre fidèlement les variations de la pression qui agit sur lui.

(1) *Voir* pour la description de cet instrument, *Phys. méd. de la circul. du sang*, p. 141; et présent volume, p. 195.

Fick se sert de son manomètre à ressort dans lequel il amène la pression au moyen d'un long tube par lequel le sang pénètre dans l'appareil. La longueur de ce parcours est une cause de résistance aux mouvements du liquide toutes les fois que les systoles cardiaques se suivent avec rapidité, mais, si les systoles du cœur se succèdent à de grands intervalles, la pression a le temps de se transmettre à l'instrument d'une manière à peu près complète. Aussi l'instrument sera-t-il surtout défectueux dans les cas de systoles du cœur très-fréquentes.

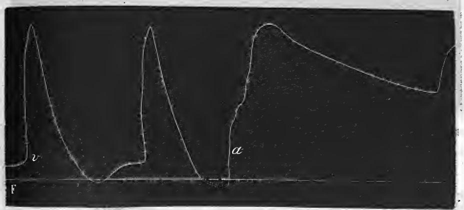


Fig. 156. — Expérience de Fick sur un cœur à rhythme lent (1).

Sur un cœur dont le rhythme était normal, Fick, reprenant l'expérience dans laquelle on explore successivement l'intérieur du ventricule gauche et celui de l'aorte, obtint le tracé figure 156, dans lequel l'oscillation *v* et celle qui lui succède expriment les variations de la pression dans le ventricule gauche; en *a* le tube explorateur de la pression est retiré du ventricule et amené dans l'aorte. Une pulsation aortique complète se voit dans la figure et, à la fin de celle-ci, le début d'une seconde pulsation aortique; or, dans ces deux pulsations, les maxima de la pression aortique sont sensiblement au même niveau que ceux de la pression ventriculaire, ce qui s'accorde avec les résultats que j'ai annoncés et dont on a vu la représentation figure 155.

Dans une autre expérience, Fick coupe les nerfs vagues : aussitôt les mouvements du cœur s'accélèrent et l'effet para-

(1) *Arbeiten aus dem Physiol. Laborat. des Wurtzburger Wochschule*, 1873, Tafel II, fig. 11.

doxal se produit, comme on le voit sur la figure 157, où les oscillations de la pression aortique se passent tout entières à un niveau beaucoup plus élevé que celui de la pression du ventricule gauche.

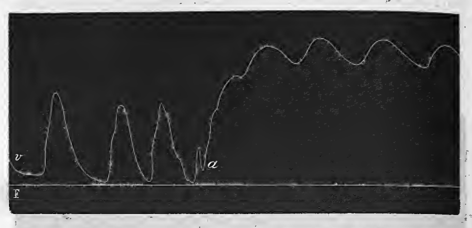


Fig. 157.— Expérience de Fick sur un animal dont les mouvements du cœur sont accélérés par la section des nerfs vagues (1).

Or, dans ce deuxième cas, au lieu d'admettre un effet de vitesse acquise du sang et une élévation réellement plus grande de la pression dans l'aorte que dans le ventricule, je conclus que le manomètre de Fick n'a pas de mouvements assez rapides pour obéir aux changements de pression qui se produisent dans le cœur accéléré par la section des nerfs vagues, que dès lors les indications de l'instrument ne font plus qu'osciller autour de la pression moyenne : or, celle-ci est incontestablement plus faible dans le ventricule que dans l'aorte, attendu que, pendant les périodes de relâchement du ventricule, la pression peut y tomber au-dessous de zéro (2).

Si l'on se reporte à la figure 155 qui montre les courbes de la pression obtenues avec une sonde cardiaque, ou à la figure 156 tracée par le manomètre de Fick sur un animal à circulation lente, on constate que, dans l'un et l'autre cas, la moyenne des oscillations ventriculaires serait beaucoup plus basse que celle des oscillations aortiques, et que tout appareil trop peu mobile pour suivre fidèlement ces variations de pression n'eût donné

(1) Fick, *ibid.*, fig. 12.

(2) *Voir* les expériences faites au moyen de la sonde qui signale les pressions négatives (*Phys. méd. de la circul. du sang*, p. 94).

dans ces deux cas, que des oscillations incomplètes et voisines de ces moyennes.

Or, un instrument qui peut obéir à des changements de pression un peu lents est incapable de suivre des changements plus rapides; c'est pourquoi le manomètre de Fick devient infidèle aussitôt que le rhythme du cœur s'accélère comme cela se voit figure 157.

Pour apporter des preuves à l'appui de ces arguments, j'ai fait sur le *schéma de la circulation* (1) deux expériences comparatives. Dans l'une je transmettais la pression du liquide au manomètre par des voies courtes et larges, c'est-à-dire dans les meilleures conditions pour que le manomètre obéît rapidement; dans l'autre, la transmission de la pression s'opérait par un tube long et étroit, c'est-à-dire dans les conditions où l'instrument ne peut pas obéir d'une manière assez rapide. Ces deux expériences ont fourni le résultat que je prévoyais, c'est-à-dire que le paradoxe de Fick s'est produit lorsque j'eus rendu le manomètre paresseux.

Voici les figures obtenues dans ces deux expériences comparatives :

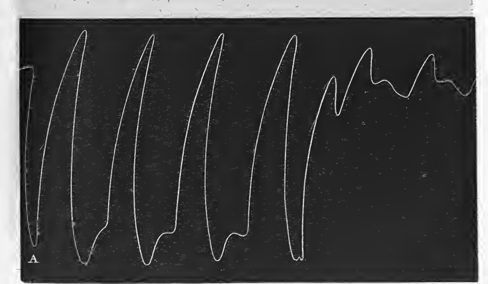


Fig. 158. — Inscription des variations de la pression ventriculaire, puis de la pression aortique sur le schéma, au moyen d'un appareil manométrique d'une grande mobilité.

Dans la figure 158 se voient les oscillations de la pression

(1) V. pour la description de cet appareil t. I, 1875, p. 66.

ventriculaire au commencement de la figure, puis celles de la pression aortique. Les maxima, dans le ventricule, sont notablement plus élevés que dans l'aorte, ce qui concorde avec ce qu'on observe sur les animaux; il faut, en effet, pour que le sang s'échappe du ventricule avec vitesse, qu'il soit soumis à une poussée sensiblement plus grande que la pression contre laquelle il doit lutter en pénétrant dans les artères. L'explorateur employé pour mesurer la pression était un *sphygmoscope* (1) dans lequel je faisais pénétrer le liquide par un tube gros et court.

Dans une seconde expérience, j'adapte au même sphygmoscope un tube long et étroit (2) pour la transmission de la pression. La résistance qu'éprouve cette longue colonne liquide suffit pour diminuer beaucoup la rapidité des indications du sphygmoscope, aussi voit-on apparaître l'effet paradoxal signalé par Fick, sans qu'on puisse accuser une autre influence que la trop faible mobilité de l'appareil manométrique. Le résultat de cette expérience est représenté figure 159.

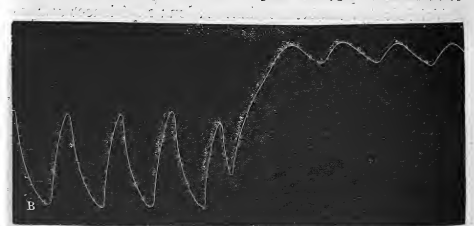


Fig. 159. — Inscription des variations de la pression ventriculaire, puis de la pression aortique sur le schéma, au moyen d'un appareil manométrique peu mobile.

J'ai longuement insisté, à propos de la valeur comparée des différents manomètres (3), sur la nécessité de faire communiquer ces appareils avec les cavités sanguines par des voies

(1) *Voir* pour la description, p. 197.

(2) La longueur du tube était de 0,30 centimètres et son diamètre intérieur de 2 millimètres environ.

(3) *Voir* pour cette comparaison des différents manomètres, p. 193 et suiv.

courtes et larges, sauf à transmettre, par des tubes à air, les indications de l'instrument au levier qui doit les inscrire. L'appareil de Fick semble devoir toujours présenter peu de mobilité, puisque la pression lui arrive par un tube généralement assez long. Que dire, après cela, des expériences de M. Gradle qui, au lieu d'amener la pression cardiaque à son manomètre au moyen d'un large tube, perforait les parois ventriculaires avec une canule pointue?

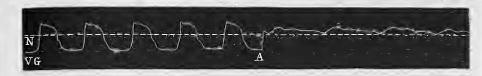


Fig. 160. — Hémorrhagie abondante sur un cheval; tracés de la pression ventriculaire gauche V G et de la pression artérielle A

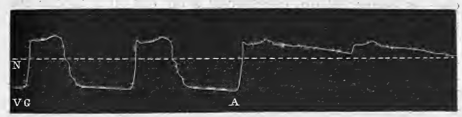


Fig. 161. — La moelle épinière a été coupée sur un cheval; tracés de la pression ventriculaire gauche V G et aortique A.

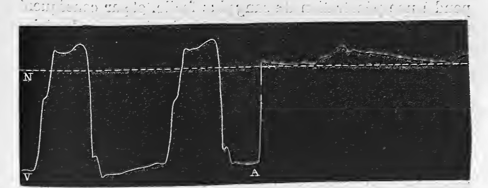


Fig. 162. — Action de la digitale sur le cheval : accroissement passager de l'énergie ventriculaire. — V, pression ventriculaire gauche. — A, pression aortique.

B) *La pression ventriculaire gauche est toujours supérieure à celle de l'aorte.* — Dans les anciennes expériences que j'ai publiées sur ce sujet avec Chauveau, nous disions que les maxima de la pression dans l'aorte sont sensiblement les

mêmes que dans le ventricule. Pour mieux spécifier la relation qui existe entre ces deux pressions, il faudrait dire que la pression ventriculaire est toujours plus élevée que celle de l'aorte, en considérant, bien entendu, les maxima de ces pressions.

Cette loi absolue ressort de l'examen d'un grand nombre de tracés que j'ai réunis à différentes époques.

Si l'on observe les conditions dans lesquelles l'expérience a été faite, on voit que l'écart entre les maxima de la pression aortique et de la pression dans le ventricule gauche n'est pas toujours le même. Cet écart, comparé à celui qui existe dans les conditions normales (fig. 155), est augmenté dans les cas où la pression artérielle est basse, soit pour cause d'hémorrhagie comme dans la figure 160, soit pour cause de passage plus rapide du sang artériel à travers les petits vaisseaux, comme dans la figure 161 qui correspond à un cas où la moelle épinière avait été coupée à la région cervicale.

D'autre part, l'écart est augmenté quand la force du ventricule est accrue comme cela s'observe dans la figure 162 où l'action de la digitaline avait augmenté l'impulsion ventriculaire.

Cet excès de la force impulsive du ventricule sur la pression artérielle qui constitue la résistance à vaincre, correspond à une pénétration du sang plus facile, et par conséquent plus rapide et plus abondante, ainsi qu'on le verra plus loin.

C) *De l'instant où se fait l'ouverture des valvules sigmoïdes.* — Comme c'est le même instrument qui plonge tour à tour dans le ventricule et dans l'aorte, on peut être assuré que, dans les courbes aortique et ventriculaire, à un même niveau correspondra toujours une même valeur de la pression. De sorte que, dans les tracés mixtes qui viennent d'être représentés, une ligne horizontale qui passerait par l'origine des pulsations aortiques couperait les courbes cardiaques au point précis où se produit le soulèvement des sigmoïdes (1). Ce moment est celui où la pression est la même dans le ventricule et dans l'aorte.

(1) Dans la plupart des cas les influences respiratoires empêchent cette ligne d'être droite.

La ligne des pressions égales, qui passerait par l'origine de toutes les pulsations aortiques, coupe les courbes cardiaques en un point plus ou moins rapproché de leurs sommets. Plus la partie qui s'élève au-dessus de cette ligne présente de surface dans l'une et l'autre courbes, plus elle annonce que la systole cardiaque a fourni une ondée abondante.

L'identité presque complète de la partie située au-dessus de la ligne d'égales pressions, dans le tracé du ventricule et dans celui de l'aorte, s'explique parfaitement par la large communication qui existe alors entre le cœur et le système artériel. Dans les deux tracés, les mêmes inflexions s'observent; elles consistent, en général, en une élévation graduelle de la pression succédant à l'augmentation soudaine du début. Cette augmentation lente tient, dans l'aorte, à ce que l'afflux du sang l'emporte sur l'écoulement, et, dans le ventricule, ce même accroissement provient de ce que la pression intra-cardiaque est, à ce moment, solidaire de celle de l'aorte.

C') *Reproduction de ces expériences sur le schéma de la circulation.* — Le but principal du schéma étant de contrôler instantanément les théories relatives aux phénomènes mécaniques de la circulation, je m'empressai de reproduire, au moyen de cet appareil, les expériences de cardiographie qui viennent d'être rapportées.

Comme la disposition du schéma ne permet pas l'introduction d'une sonde volumineuse qui, passant par l'aorte, pénétrerait dans l'intérieur du ventricule, je recourus à l'artifice que voici. Je pris un tube qui, partant de l'intérieur du ventricule, amenait au dehors la pression du liquide intra-ventriculaire, et, réunissant ce tube avec une artère du schéma, je fis aboutir ces deux conduits à un troisième qui les recevait à la façon des branches d'un Y. Ce troisième tube fut mis en rapport avec un sphygmoscope ou un manomètre inscripteur. Je pris soin de donner le moins de longueur possible à ces conduits afin d'éviter les inconvénients des résistances à la propagation de la pression (1). Enfin, saisissant entre les doigts les deux branches du tube bifurqué, je com-

(1) *Voir* page 204.

primai tour à tour chacune d'elles, de façon que le manomètre recevait tantôt exclusivement la pression ventriculaire et tantôt la pression artérielle. Je devais ainsi obtenir des effets identiques à ceux que l'on observait quand la sonde exploratrice de la pression était plongée alternativement dans le ventricule et dans l'oreillette. L'expérience confirma ces prévisions.

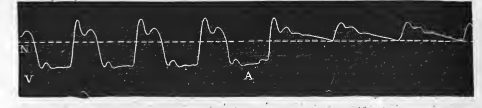


Fig. 163. — Tracés comparatifs de la pression ventriculaire V et de la pression artérielle A sur le schéma, dans un cas où la tension artérielle était élevée.

La figure 163 montre, au point V, l'inscription des variations de la pression dans le ventricule du schéma.

Au point A le tube ventriculaire est comprimé, tandis qu'on lâche celui de l'artère ; à ce moment le manomètre inscrit la pression artérielle (l'artère explorée était l'homologue de la carotide).

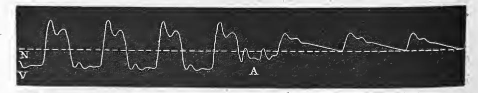


Fig. 164. — Tracés comparatifs de la pression ventriculaire V et de la pression artérielle A sur le schéma dans un cas de tension artérielle faible.

Une ligne ponctuée horizontale indique, dans cette figure, le niveau de la pression minima dans l'artère; on constate qu'il est assez rapproché des sommets de la courbe ventriculaire. Les maxima, de part et d'autre, s'élèvent à peu près à la même hauteur. Or, cela correspond, avons-nous dit, aux cas où la pression du sang est forte dans les artères. En effet, on avait fermé presque complètement les robinets par lesquels se fait l'écoulement des artères dans les veines du schéma, et le manomètre à mercure accusait une forte pression dans l'appareil.

Dans une deuxième expérience, on ouvre un peu plus ces robinets qui représentent les résistances capillaires, et l'on répète l'expérience de tout à l'heure ; la figure 164 montre que la ligne des minima de la pression artérielle correspond à une phase moins avancée de la systole ventriculaire ; en d'autres termes, que la différence entre les maxima de la pression dans le cœur et dans les artères est sensiblement plus grande que tout à l'heure, ce qui est, comme on l'a vu plus haut, un caractère de la faible pression.

VI. — Volume et vitesse des ondées ventriculaires suivant l'état de la pression aortique.

Solidarité de la pression aortique et de la pression ventriculaire ; cas où la systole est trop faible pour vaincre la pression aortique ; cas où la pression aortique est trop forte et entraîne une insuffisance de la valvule mitrale. — Irrégularités périodiques du pouls dépendant de conditions mécaniques ; nature du pouls bigéminé; contrôle sur le schéma. — Le volume des ondées ventriculaires dépend du degré de la tension artérielle ; loi qui préside à l'amplitude du pouls. — Vitesse de l'ondée ventriculaire suivant l'état de la tension aortique.

Il existe nécessairement une solidarité entre la pression ventriculaire et la pression aortique, de telle sorte qu'un surcroît de l'action du ventricule entraîne une augmentation de pression dans l'aorte, et que, réciproquement, une augmentation de la pression aortique élève les maxima de la pression dans le ventricule. De sorte que toute influence qui modifie la pression maximum du sang dans une de ces régions la modifie aussi dans l'autre.

On a vu comment les choses se passent quand le cœur augmente d'énergie (1) ; on a vu également l'effet que produit le changement d'écoulement à travers les capillaires qui, élevant ou abaissant primitivement la pression du sang dans les artères, élève ou abaisse secondairement la pression intra-cardiaque (2). Un nouvel exemple de cette solidarité va nous être fourni par le cas où la fréquence des mouvements du cœur s'accroîtrait sans que rien autre fût changé à l'état circulatoire. La figure 165 est un triple tracé recueilli sur le schéma avec accélération graduelle du rhythme des systoles ventriculaires. La ligne supérieure P représente la pulsation cardiaque ;

(1) Tracé de la digitaline, fig. 162.
(2) *Voir* les expériences sur le schéma, p. 330.

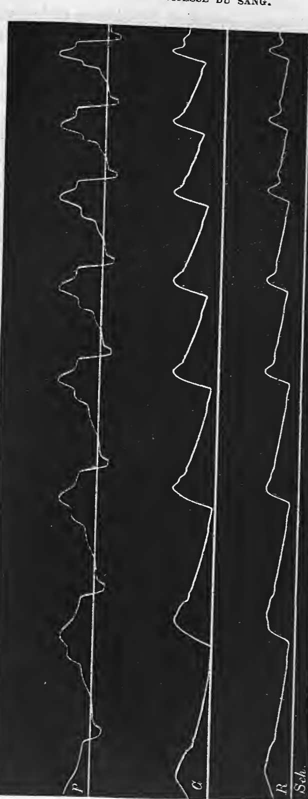


Fig. 165. — Tracés recueillis sur le schéma. — P, pulsation du cœur. — C, pouls carotidien. — R, pouls radial dans un cas d'accélération graduelle du rhythme des mouvements du cœur.

la seconde C, le pouls carotidien, la troisième R, le pouls radial. Des lignes droites horizontales servent de repères pour évaluer la pression.

A mesure qu'on accélère le rhythme des mouvements cardiaques, on voit se produire les deux phénomènes suivants qui sont inséparables l'un de l'autre.

La pression artérielle s'élève, car le nombre des ondées ventriculaires qui pénètre dans les artères s'accroît, tandis que l'écoulement reste le même. En même temps, la presssion maximum dans le ventricule augmente, ainsi qu'on peut s'en assurer par la hauteur à laquelle s'élève la courbe des pulsations (1) dans le moment de la fréquence la plus grande.

Il ne faudrait pas s'étonner de cette harmonie parfaite entre la pression développée par le cœur et celle qui existe dans l'aorte, et il ne faudrait pas croire que le centre d'innervation cardiaque, averti par une sorte de sensibilité intérieure du degré de pression que la systole prochaine devra vaincre, proportionne l'effort musculaire à la résistance qu'il rencontrera. Les choses se passent d'une manière beaucoup plus simple, puisque la même harmonie que l'on rencontre dans la nature s'observe aussi dans les appareils artificiels. Le raccourcissement de la fibre musculaire du cœur, tout en restant identique à lui-même, peut développer des efforts bien différents suivant la résistance qui lui est opposée. La fibre cardiaque, pourvue d'élasticité, acquiert des tensions différentes suivant que le liquide qu'elle comprime cède plus ou moins à son effort. En somme, et c'est la comparaison la plus juste, la valvule aortique joue pour le ventricule gauche le rôle de soupape de sûreté et la pression du liquide ventriculaire cesse de s'élever aussitôt qu'elle a atteint le degré nécessaire pour surmonter celle qui charge la soupape. Dès que celle-ci est ouverte, la pression ne monte plus dans le ventricule, à moins qu'elle ne s'élève également dans l'aorte, ainsi que cela se voit dans les cas où le sang a de la peine à sortir du système artériel.

Mais toutes les fois que la pression maximum dans le ventricule gauche n'atteint pas la valeur de la pression aortique, la systole est inefficace et n'envoie pas de sang dans les ar-

(1) *Voir* pour l'explication de cette courbe, vol. I. 1875, p. 79.

tères. Ces cas peuvent se produire dans deux conditions : soit par suite d'une faiblesse excessive d'une ou de plusieurs systoles ventriculaires, soit par suite d'une élévation exagérée de la tension artérielle.

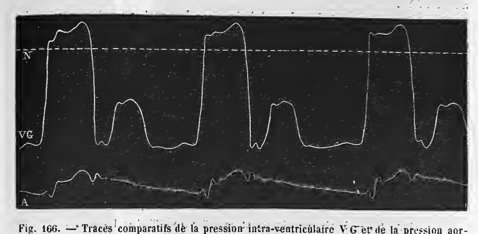


Fig. 166. — Tracés comparatifs de la pression intra-ventriculaire V G et de la pression aortique A sur un cheval. Des systoles accidentelles très-faibles ne produisaient aucun changement dans la pression du sang dans l'aorte ; leur maximum n'atteignait pas la ligne de niveau N qui correspond au minima de la pression artérielle.

La figure 166 montre un bel exemple du premier genre de systoles inefficaces. Un cheval avait dans le ventricule gauche une sonde un peu trop profondément engagée et dont l'extrémité, heurtant le fond du ventricule à chaque systole de cet organe, provoquait une excitation traumatique à la suite de laquelle une autre systole se produisait, prématurée et très-faible comme celles qui succèdent à certaines excitations artificielles (1). Or, ces systoles secondaires n'amenaient pas dans le ventricule une pression suffisante pour vaincre celle du sang aortique qui chargeait les sigmoïdes, aussi ne pénétrait-il pas de sang dans l'aorte, ainsi qu'on peut en juger par le tracé des pulsations aortiques recueilli en même temps que les variations de la pression ventriculaire.

Ce phénomène se produit assurément chez l'homme dans certains cas ; j'ai encore le souvenir d'un malade qui, à l'auscultation du cœur, donnait quatre bruits correspondants à deux systoles consécutives, tandis que sa radiale ne battait qu'une fois. Quelques médecins considéraient ce cas singulier

(1) Voy. *Mémoire sur l'excitabilité du cœur*, p. 76.

comme un dédoublement des deux bruits du cœur, mais la double pulsation cardiaque qui se produisait à chaque pulsation radiale ne permettait pas d'admettre cette supposition, et prouvait qu'il s'agissait bien réellement de deux systoles consécutives.

Parfois, une systole plus faible que les autres est assez forte cependant pour soulever les valvules sigmoïdes, et faire pénétrer un peu de sang dans l'aorte; mais la pression aortique présente alors une élévation moins forte que de coutume; le pouls des artères semble comme avorté.



Fig. 167. — Pouls périodiquement irrégulier recueilli chez l'homme.

Dans cette figure, la seconde pulsation semble correspondre à une systole trop faible. Dans certains tracés du pouls, on trouve des pulsations encore plus avortées. Mais ce n'est pas toujours une insuffisance de la force du ventricule qui produit ces ondées incomplètes; elles sont dues parfois à un excès de la pression artérielle, excès que le ventricule ne peut surmonter parce que la valvule mitrale cède sous une pression trop énergique. Cette forme d'insuffisance mitrale presque physiologique revêt une périodicité qui semblerait au premier abord s'expliquer par une influence nerveuse, mais qui tient réellement à des conditions purement mécaniques. Voici dans quelles conditions ce fait s'est présenté à mon observation :

J'expérimentais, sur le schéma, de nouvelles valvules que je venais de construire; la mitrale était un peu plus courte que de coutume; quoique bien hermétique, elle se laissait déformer par les pressions trop fortes et permettait alors le reflux du liquide. En imprimant au moteur du schéma un mouvement bien régulier, je m'aperçus que les pulsations étaient périodiquement irrégulières, ainsi que cela se voit sur la figure 168.

Examinant alors le fonctionnement des valvules, je constatai que la mitrale donnait passage à un fort reflux de li-

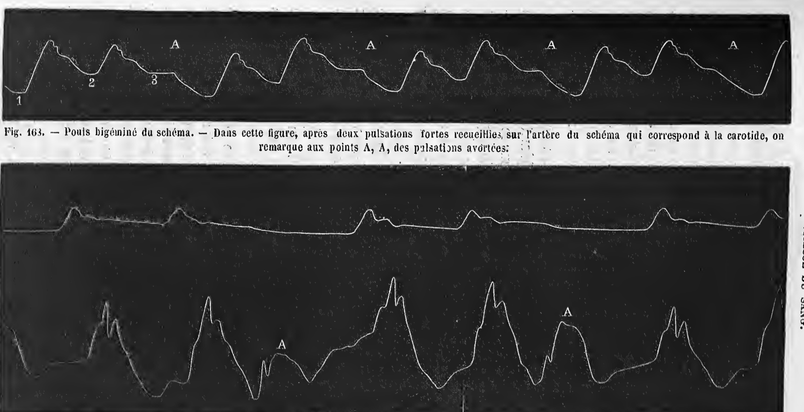


Fig. 163. — Pouls bigéminé du schéma. — Dans cette figure, après deux pulsations fortes recueillies sur l'artère du schéma qui correspond à la carotide, on remarque aux points A, A, des pulsations avortées.

Fig. 169. — Pouls bigéminé et cœur sur le schéma. — Tracés simultanés de la carotide et de la pulsation cardiaque recueillis sur le schéma. — Le pouls carotidien (ligne supérieure) présente des avortements périodiques. — Le tracé de la pulsation ventriculaire présente, en correspondance avec les pulsations carotidiennes avortées, des courbes plus basses que de coutume et caractéristiques de l'insuffisance mitrale.

quide à toutes les troisièmes révolutions du cœur ; à l'auscultation, on entendait un souffle très-intense au moment où se produisait l'avortement d'une pulsation.

Je voulus voir alors ce qui se passait du côté de la pulsation cardiaque, et je recueillis, sur un axe rapide, en même temps que le tracé du pouls carotidien, celui de la pulsation cardiaque du schéma. Le tracé que j'obtins (fig. 169) présente, du côté de la pulsation cardiaque, un avortement analogue à celui qui existe dans le pouls carotidien. Le sommet de cette pulsation est arrondi, comme l'a signalé Tridon dans ses recherches de cardiographie clinique sur l'insuffisance mitrale (1).

Cette figure montre clairement la solidarité de la pression ventriculaire avec la pression aortique sur le schéma. Aussitôt que le reflux vient limiter la pression que le sang peut acquérir dans le ventricule, la pulsation du cœur se limite dans son intensité, car celle-ci correspond au durcissement du ventricule, signe extérieur de la pression du liquide contenu dans l'intérieur de cette cavité (2).

Mais, dira-t-on, comment expliquer le rhythme régulier qui préside à ce reflux mitral? Pourquoi ne voit-on pas deux pulsations consécutives avorter, ni trois pulsations fortes se produire de suite?

C'est là justement le point intéressant du phénomène; ce rhythme va s'expliquer mécaniquement de la façon la plus satisfaisante.

Si l'on examine attentivement la figure 168, on remarque que les pulsations fortes créent dans les artères une pression graduellement croissante; c'est-à-dire qu'après une pulsation avortée, la première pulsation normale part d'un niveau assez bas (1, fig. 168) ; la seconde pulsation trouve une pression plus forte à son origine au point 2; la troisième trouvera une pression plus forte encore, et c'est justement pour cela que la valvule mitrale cède ; car, dans le ventricule, la pression doit atteindre celle de l'aorte, sous peine de ne pouvoir en-

(1) *Thèse inaugurale*, Paris, 1875.
(2) *Voir* pour la théorie de la pulsation du cœur, vol. 1er, 1875, p. 27.

voyer de sang dans l'artère. Or, la valvule mitrale cède ; le reflux se fait du ventricule dans l'oreillette ; rien ou presque rien n'arrive dans l'aorte, et, grâce à cet avortement de l'ondée ventriculaire, la pression aortique baisse considérablement. Aussi l'ondée ventriculaire suivante trouvera-t-elle une grande facilité à pénétrer dans l'aorte, la seconde systole y rencontrera une pression déjà plus grande, mais la troisième ne pourra y pénétrer. Cette série de trois pulsations se reproduira donc indéfiniment pour les raisons mécaniques dont il vient d'être parlé. En ne résistant pas d'une manière absolue à l'élévation de pression qu'elle doit supporter, la valvule mitrale constitue, dans ces conditions, une véritable soupape de sûreté qui, limitant l'effort ventriculaire, limite également l'élévation de la pression dans les artères.

Pour faire encore une fois la contre-épreuve de cette théorie, je changeai le rhythme du cœur, et je vis qu'en ralentissant les mouvements imprimés à la machine motrice du schéma, on allongeait la période des intermittences du pouls ; qu'on la portait à 3, à 4 pulsations fortes entre chaque pulsation avortée ; on arrivait, en ralentissant encore le rhythme cardiaque, à supprimer entièrement ces irrégularités.

Il est clair qu'en espaçant de plus en plus les systoles cardiaques, on donne à la tension artérielle le temps de baisser de plus en plus par l'effet de l'écoulement à travers les capillaires ; aussi arrive-t-il un moment où, entre deux fortes systoles, la tension artérielle retombe à un niveau qui permet au ventricule d'envoyer sa nouvelle ondée sans développer une pression qui excède la résistance de la valvule mitrale.

Ce phénomène peut-il se produire sur le vivant ? Cela n'est pas douteux, et je n'en veux pour preuve que l'identité des tracés du pouls de certains sujets avec celui que j'ai recueilli sur le schéma et que j'ai représenté, figure 168.

Si le lecteur veut bien se reporter à la figure 167, il verra que dans ce rhythme redoublé du pouls la pulsation, partiellement avortée, naît à un moment où la pression est plus élevée dans les artères qu'au moment où se produit la pulsation forte. Ce cas semble donc se rattacher à celui dont la théorie vient d'être donnée tout à l'heure.

Chez certains sujets, ces intermittences du pouls s'accompagnent d'un bruit de souffle systolique au moment de la pulsation avortée ; il est bien clair que chez ces sujets un reflux mitral se produit à ce moment, et tout porte à croire que ce reflux cesserait si la pression artérielle était moins forte. On pourrait donc faire disparaître ces irrégularités périodiques du pouls en faisant baisser la tension artérielle d'une manière quelconque. Il sera bien facile de vérifier cette théorie en soumettant, par exemple, à l'action d'une ventouse Junod, un sujet qui présenterait des intermittences de ce genre.

Du reste j'ai observé un cas dans lequel des intermittences périodiques cessaient sous l'influence de la marche, c'est-à-dire dans des conditions où la tension artérielle est plus basse que pendant le repos. Souvent aussi les intermittences périodiques m'ont paru réglées avec le rhythme de la respiration. Or on sait quelle influence les mouvements respiratoires exercent sur la tension artérielle. Il sera intéressant de chercher si l'intermittence coïncide avec le moment où la pression artérielle est augmentée.

J'ai dit tout à l'heure que ce phénomène de reflux par la valvule mitrale est, pour ainsi dire, physiologique ; en effet, on peut l'observer sur des animaux parfaitement sains. M. François-Franck, en feuilletant ses registres d'expériences (1), a trouvé un cas fort curieux dans lequel, après la section des nerfs vagues sur un lapin, on voyait la tension artérielle s'élever très-haut, puis retomber de temps en temps par une chute brusque après laquelle elle remontait (fig. 170) de nouveau. Or, au moment de chacune de ces chutes, il y avait une pulsation artérielle, avortée et en coïncidence parfaite avec cette pulsation artérielle absente ; on trouvait dans les tracés de la pulsation cardiaque une systole également avortée qui semble devoir s'expliquer par une insuffisance mitrale.

C) Dans les nombreux tracés qui ont été représentés ci-des-

(1) Ce n'est pas un des moindres avantages de la méthode graphique, de permettre la vérification instantanée d'une hypothèse en évoquant une expérience parfois très-ancienne et qui apparaît avec tous ses détails comme au moment où elle a été faite.

sus, on a pu voir que l'amplitude des variations de la pression artérielle va toujours en diminuant à mesure que la pression s'élève (1) ; cela tient à une cause mécanique : la pénétration plus difficile et moins abondante du sang dans le système artériel à mesure que le cœur trouve moins de facilité à l'y introduire. Cette loi se trouve clairement écrite dans les tracés où le pouls présente des irrégularités périodiques : la première pulsation qui suit la systole avortée a une grande amplitude parce qu'elle arrive dans un moment de faible tension artérielle ; la seconde se produit dans un moment où la tension est déjà moins faible, aussi a-t-elle moins d'amplitude.

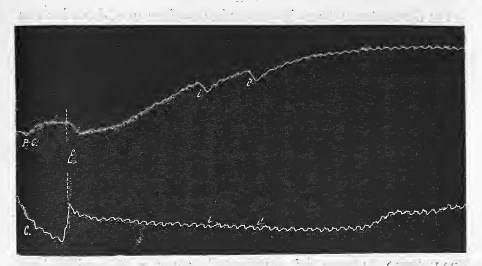


Fig. 170. — Rapports des systoles avortées i i' (ligne C) et des intermittences i i' du pouls carotidien (ligne PC) chez un lapin dont les nerfs vagues étaient coupés. (Héliogravure.)

Dans certains cas, on voit les irrégularités se produire à plus longues périodes ; on observe alors une série de pulsations d'amplitudes graduellement décroissantes qui précèdent le moment du reflux mitral : celui-ci, amenant une chute soudaine de la pression artérielle, provoque une nouvelle série de pulsations d'intensités décroissantes.

J'ai formulé autrefois cette loi (2), que *l'amplitude du pouls*

(1) Il faudrait faire une exception pour les cas où le ventricule aurait des systoles plus énergiques.

(2) *Physiol. méd. de la circul. du sang*, p. 233.

est en raison inverse de la tension artérielle, et, constatant que le fait se vérifiait dans des conditions purement physiques, j'ajoutais alors que *la force du pouls ne doit pas faire préjuger de la force du cœur*. Mais, à l'époque déjà éloignée où j'écrivais ce travail, je me préoccupais surtout des effets que produit la dilatation des voies d'écoulement du sang. Voyant que cette dilatation amène l'augmentation de l'amplitude du pouls, je m'expliquais ce résultat par une chute plus profonde des minima de la pression entre deux pulsations consécutives, et ne m'arrêtais pas à l'autre facteur de la pulsation artérielle : le volume de l'ondée cardiaque.

On démontrera dans le prochain chapitre que, dans les cas de tension artérielle forte, l'ondée ventriculaire est réellement moins volumineuse qu'à l'état normal. Ce n'est pas que le ventricule déploie moins de force ; au contraire, on a vu que, la tension de ses parois musculeuses étant plus grande, il en résulte un plus grand effort. Mais le cœur, dont le travail tend à rester uniforme, accomplit sa systole en chassant sous une charge plus grande un moindre volume de liquide (1).

La *vitesse* avec laquelle le sang s'échappe du ventricule est en raison inverse de la pression du sang dans les artères. Cela résulte, à égale durée de la systole ventriculaire, du moindre volume de sang qui, pendant ce temps, a été projeté dans le système artériel. Mais, outre les preuves tirées du raisonnement, on peut en fournir d'autres qui sont d'ordre expérimental.

J'invoquerai à cet égard les expériences dans lesquelles on ausculte le cœur d'un animal en même temps qu'on lui pratique une hémorrhagie artérielle. A un moment donné, quand la pression a baissé d'une manière suffisante, on entend un bruit de souffle à l'orifice aortique : ce souffle ne doit s'expliquer que par la brusque différence de pression qui se produit au niveau de l'orifice aortique entre le sang du ventricule et celui

(1) Si l'on se reporte à la figure 169, on voit dans la pulsation du cœur du schéma que l'évacuation ventriculaire est moindre à la fin du tracé, où la pression est forte, qu'au commencement, où cette pression était faible.

de l'aorte. Ce bruit de souffle, expression de la vitesse avec laquelle le sang passe du ventricule dans l'aorte, devient de plus en plus fort et de plus en plus bref à mesure que l'animal perd du sang, ce qui prouve que, par suite de l'abaissement de la pression aortique, les systoles du ventricule envoient le sang avec une rapidité de plus en plus grande.

(*A suivre.*)

IX

RECHERCHES SUR LE MÉCANISME DE LA CIRCULATION DANS LA CAVITÉ CÉPHALO-RACHIDIENNE

Par A. SALATHÉ.

INTRODUCTION.

Les *mouvements du cerveau*, faciles à constater quand le crâne présente des parties molles ou des pertes de substance, sont révoqués en doute chez l'adulte, dans l'état d'intégrité de la boîte crânienne, par un grand nombre de physiologistes.

Ces mouvements alternatifs qui doivent être considérés, non comme des soulèvements et des abaissements, mais comme des expansions et des resserrements successifs de la masse encéphalique (1), sont intimement liés au déplacement du liquide céphalo-rachidien dont l'existence a été remise en lumière par Magendie, après avoir été oubliée depuis Cotugno et Haller qui l'avaient autrefois signalée.

C'est à l'étude de ces mouvements complexes que nous nous sommes appliqué : nos expériences ont été poursuivies

(1) V. Mémoire I du présent volume : « Des changements du volume des organes » et, pour les détails, Piégu, *C. R. Acad. sc.*, 1846, et *Arch. de phys.*, 1872.

dans le laboratoire du professeur Marey (1), depuis le mois de juin 1875 jusqu'à ces derniers jours, et le principe de la méthode employée ainsi que les principaux résultats observés ont fait l'objet d'une note communiquée à l'Académie des sciences, le 19 juin 1876.

Dans certaines conditions, les mouvements du cerveau, en rapport, comme ceux des autres organes, avec le pouls artériel et les mouvements respiratoires, sont accessibles à la vue, indiscutables par conséquent : ces conditions sont réalisées par la nature, chez les jeunes sujets dont le crâne est incomplétement ossifié, et par le traumatisme accidentel ou expérimental, quand existe une perte de substance osseuse.

Mais le cerveau de l'homme, dont les parois crâniennes sont complétement ossifiées, est-il également soumis à ces variations rhythmiques de volume, dépendant des divers degrés de réplétion des vaisseaux? Se sépare-t-il, à cet égard, des autres tissus vasculaires? Telle est la question que nous chercherons à résoudre.

Cet objectif principal de notre étude sera envisagé, au double point de vue critique et expérimental, dans les deux parties suivantes :

Première partie. — *Étude de la circulation dans la cavité céphalo-rachidienne, les parois crâniennes étant dépressibles ou présentant une perte de substance.*

Deuxième partie. — *Étude de la circulation céphalo-rachidienne chez l'homme adulte, c'est-à-dire dans le cas d'inextensibilité des parois du crâne.*

---

(1) Nous avons eu constamment recours à la méthode graphique pour contrôler les résultats de nos expériences, que nous pourrons ainsi mettre en quelque sorte sous les yeux du lecteur. Nous avons été favorisé dans cette voie par les nombreuses ressources que nous avons trouvées au Collége de France, dans le laboratoire du professeur Marey, dont les bienveillants conseils et les encouragements ne nous ont jamais fait défaut. Nous sommes heureux de pouvoir lui en témoigner ici toute notre reconnaissance. Nous devons aussi remercier particulièrement notre ami, son préparateur, le Dr François-Franck, dont l'assistance nous a souvent été précieuse dans le cours de nos expériences.

PREMIÈRE PARTIE.

De la circulation dans la cavité céphalo-rachidienne, les parois crâniennes étant dépressibles ou présentant une perte de substance.

I. — DES CENTRES NERVEUX ET DES MOUVEMENTS ENCÉPHALIQUES.

Le système nerveux central de la vie de relation, enfermé dans la cavité céphalo-rachidienne, est composé de l'encéphale qui remplit la presque totalité de la boîte crânienne, et baigne dans une faible couche de liquide communiquant avec le liquide ventriculaire (1), et de la moelle épinière placée dans la cavité rachidienne, dont elle est loin de remplir la capacité.

La plus grande densité du tissu médullaire, sa moindre vascularisation, la consistance fibreuse de la pie-mère qui s'oppose à des variations de volume un peu notables, sont autant de conditions qui permettent de n'accorder aux expansions et resserrements de la moelle qu'une bien faible im-

(1) La communication entre le liquide sous-arachnoïdien et le liquide ventriculaire se fait par l'intermédiaire du trou de m agendie, étroit orifice situé à la partie inférieure du quatrième ventricule. Elle est prouvée par le fait du passage d'un liquide coloré qui, introduit dans le ventricule olfactif d'un chien, manifeste bientôt sa présence dans le liquide céphalo-rachidien qui entoure la moelle. Cruveilhier cependant, ne considérant pas cette preuve comme absolue, met en doute la réalité de cette communication. (*Anat.*, 4e édit., t. III, p. 385.)

portance, en regard des variations que peut subir l'encéphale (1).

Mais si la moelle, en raison des causes précédentes, offre des changements de volume moins notables que le cerveau, la quantité plus grande de liquide sous-arachnoïdien qui la baigne constitue une donnée importante dont nous aurons à tenir le plus grand compte (2).

Rappelons tout d'abord, aussi succinctement que possible, les différentes théories proposées pour l'interprétation des mouvements du cerveau dans les cas où la constitution normale ou accidentelle des parois crâniennes les rend indiscutables.

Ces différentes théories se ramènent à *trois* groupes principaux :

1° Pour les uns, les mouvements du cerveau dépendraient uniquement des *battements artériels*. Telle est la manière de voir de Richerand (3), qui s'exprime ainsi à ce sujet : « Les mouvements alternatifs d'élévation ou d'abaissement qu'offre le cerveau sont isochrones à la systole et à la diastole des artères *placées à sa base* (4) : l'élévation correspond à la dilatation, l'abaissement au resserrement de ces vaisseaux ; la respiration n'est *pour rien* dans ce phénomène. »

2° Pour d'autres, les mouvements cérébraux ne se rattacheraient qu'aux *mouvements respiratoires*. Cette opinion est celle de Flourens, qui, après avoir relaté l'interprétation de

(1) Ces variations de volume du contenu de la cavité crânienne ne dépendent pas exclusivement du tissu de l'encéphale. Il faut également tenir compte du changement de calibre des vaisseaux situés dans la boîte crânienne, en dehors de la masse nerveuse encéphalique, la rigidité des parois des sinus ne permettant pas, il est vrai, de leur attribuer une part considérable dans la production du phénomène.

(2) La capacité du canal rachidien peut varier en effet dans une assez large mesure, comme on peut l'admettre *à priori* en considérant les anastomoses multiples des plexus veineux rachidiens, soit avec les sinus encéphaliques, soit avec le système azygos. (*V.* Cruveilhier, *Anat. descr.*, t. III, 4[e] éd., et Breschet, *Sur les veines du rachis*, Th. Paris, 1818.)

(3) Richerand, *Éléments de physiologie*, Paris, 1833.

(4) C'est, comme on sait, en se basant sur les changements du calibre des vaisseaux placés à la base de l'encéphale, que plusieurs auteurs, à l'exemple de Richerand, ont cru pouvoir expliquer un mouvement d'élévation et d'abaissement en masse de l'organe.

Richerand que nous venons de citer, la critique ainsi qu'il suit (1) : « Il y a bien des erreurs dans cette proposition de Richerand ; car, comme on va le voir : 1° le mouvement du cerveau n'est pas isochrone à celui des artères, mais à celui de la respiration ; et 2° la respiration est *pour tout* (2) dans ce phénomène. » Il est difficile d'être plus affirmatif que ces deux illustres physiologistes.

3° Enfin, et c'est l'opinion la plus généralement adoptée de nos jours, les mouvements cérébraux seraient de nature double, d'origine à la fois *cardiaque et respiratoire*.

Telles sont les trois interprétations principales (3) qui ont été données des mouvements encéphaliques. Ces variations d'opinion des auteurs s'expliquent par les différences des conditions dans lesquelles ont été faites leurs expériences : car l'on pourra voir dans la suite, qu'en prenant isolément telle ou telle de nos expériences, nous pourrions soutenir successivement chacune de ces trois thèses, admettant tantôt la simultanéité des deux manifestations, tantôt la disparition de l'une ou l'autre d'entre elles. Envisager ainsi la question, serait faire preuve d'un éclectisme qu'il n'est plus permis d'adopter aujourd'hui, après les belles pages écrites à ce sujet par Cl. Bernard qui a tant et si bien insisté sur la nécessité du « *déterminisme* (4) de chaque phénomène. »

Après ce rapide exposé des opinions variées émises sur la nature des mouvements du cerveau, nous allons présenter les résultats que nous a fournis l'expérimentation, en examinant successivement :

(1) Flourens, *Recherches exp. sur le système nerveux*, Paris, 1842, p. 344.

(2) En regard de cette assertion si catégorique, il peut sembler étrange de retrouver dans une autre partie du même ouvrage (*loc. cit.*, p. 319) la phrase suivante : « Indépendamment du mouvement alternatif d'abaissement et d'élévation qui... répond aux mouvements alternatifs d'inspiration et d'expiration, et qui le meut en masse, le cerveau est sans cesse agité, *ou mû*, dans toutes ses parties, par l'action interne de la *force impulsive* des organes circulatoires. »

(3) Il y en aurait bien aussi une quatrième, celle de Dorigny (Expériences et observations sur les mouvements du cerveau, *Journal de médecine*, de Corvisart, XVIII, 1809), qui mit les mouvements cérébraux sur le compte de l'influence nerveuse. Nous nous bornerons à la mentionner, car elle est trop en contradiction avec les faits observés.

(4) Cl. Bernard, *Leçons de pathologie exp.*, Paris, 1872, p. 505 et suiv., et *Revue des cours scientifiques*, 6 février 1869.

1° Les *battements des fontanelles* chez les nouveau-nés ;

2° Les *cas* morbides *dans lesquels les parois crâniennes ou rachidiennes sont molles ou entamées*, et permettent de constater ces mouvements ;

3° Les *expériences dans lesquelles on ouvre le crâne ou le rachis* d'animaux, tels que le chien, le lapin, etc.

II. — BATTEMENTS DES FONTANELLES.

Les battements des fontanelles, très-prononcés à la naissance, vont en diminuant, à mesure que l'ossification de ces espaces membraneux fait des progrès. Ce n'est guère qu'au niveau de la fontanelle médiane antérieure, la plus grande de toutes, et celle qui disparaît la dernière, qu'on peut observer ces battements avec netteté.

Pour les soumettre à un contrôle rigoureux, nous avons eu recours à l'inscription (1), en transmettant les mouvements explorés à un tambour à levier.

Après nous être servi d'abord d'un explorateur à tambour que nous maintenions à la main, sur la fontanelle de l'enfant, nous avons bientôt reconnu la nécessité de le fixer à la tête même de celui-ci.

(1) Au cours de nos expériences, nous avons découvert qu'un essai semblable avait déjà été tenté par M. Langlet (a) qui, à propos d'un travail intéressant sur le *sommeil*, a essayé d'enregistrer les battements des fontanelles pendant cet état.

Il s'est servi, dans ce but, du sphygmographe ordinaire de Marey ; mais, outre que cet appareil est d'une application difficile sur le crâne, il ne donne que des indications de peu de durée, insuffisantes pour observer le phénomène avec suite, dans diverses phases. Le sphygmographe à transmission (*V.* volume 1875) aurait paré à ce dernier inconvénient. M. Langlet n'a donc pu réaliser l'objectif qu'il poursuivait, les enfants se réveillant à la suite de la pose de l'appareil.

Malgré l'imperfection de cette disposition, M. Langlet put obtenir quelques tracés intéressants. Il reconnut que, dans l'état de calme, les battements des fontanelles ne reproduisent que les pulsations artérielles, des mouvements correspondant à la respiration ne commençant à paraître que lorsque celle-ci est agitée, ou lorsque l'enfant crie. Ces battements, influencés par la respiration, sont naturellement d'autant plus marqués que l'agitation ou les cris sont plus prononcés.

(a) Langlet, *Sur la physiologie du sommeil*. Th. Paris, 1872.

L'explorateur que nous avons employé est un tambour ordinaire dont la membrane est repoussée par un faible ressort intérieur.

En le fixant par sa face mobile sur la fontanelle médiane antérieure de l'enfant, nous sommes arrivé, à diverses reprises, à enregistrer, pendant quelques heures consécutives, les battements de cette fontanelle dans un grand nombre de circonstances. Nous avons pu suivre, en effet, les variations d'inscription qu'amenaient les phases successives de calme ou d'agitation, de sommeil ou de réveil, ainsi que certains actes, tels que l'effort, les cris, la toux, le bâillement, l'éternument, l'action de téter.

Le type du calme le plus parfait est assurément, chez l'enfant, celui qui correspond à un sommeil calme et paisible. La figure 171 nous en offre un bel exemple.

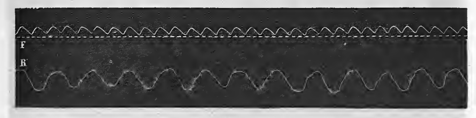


Fig. 171.—Battements de la fontanelle antérieure d'un enfant de six semaines (ligne F) pendant le sommeil, et respiration thoracique (ligne R), enregistrés simultanément.

Cette figure nous montre d'abord une ligne inférieure, celle de la respiration, qui comprend une suite d'ondulations, correspondant chacune à un acte respiratoire. Ces ondulations sont très-sensiblement égales entre elles, ce qui marque bien l'égalité et la régularité de la respiration pendant le sommeil de l'enfant.

La ligne supérieure est celle des battements de la fontanelle; une ligne de repère ponctuée permet bien d'en apprécier le niveau général. Ici encore, nous avons des ondulations égales et régulières, mais plus petites et plus nombreuses. Elles correspondent aux pulsations des artères et représentent spécialement les variations rhythmées de turgescence de l'encéphale, en rapport avec les systoles cardiaques.

Les mouvements respiratoires, comme il est aisé de s'en

rendre compte, n'exercent aucune influence, dans ce cas spécial, sur les battements de la fontanelle.

Après cette période de calme, l'enfant s'est réveillé. Il crie et l'on a peine à croire que la figure 172 représente les mêmes éléments que la précédente.

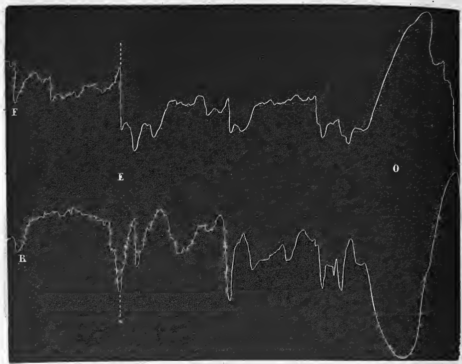


Fig. 172. — Battements de la fontaneile antérieure d'un enfant de six semaines (ligne F) enregistrés en même temps que les courbes de la respiration thoracique (ligne R), pendant les cris. Repères ponctués verticaux.

Ici, comme tout à l'heure cependant, la ligne supérieure correspond aux mouvements de la fontanelle ; la ligne inférieure, à la respiration thoracique.

La première ne rappelle en rien la précédente, et, disons-le tout de suite, l'influence exercée par la respiration prédomine à tel point que l'influence cardiaque est absolument masquée, ou tout au moins indéchiffrable.

Les tracés fournis par la fontanelle et par les mouvements respiratoires sont-ils du moins assimilables? De prime abord, ce rapprochement paraît assez difficile. On saisit cependant bientôt un rapport entre les ondulations les plus marquées de chacun des tracés; mais, tandis que les unes sont à peu près parallèles, les autres sont en opposition : une

dépression de la respiration correspondant alors à une saillie du tracé de la fontanelle. Cette contradiction toutefois n'est qu'apparente. La raison en est dans le nouveau type respiratoire adopté par l'enfant qui, du sommeil tranquille, vient de passer à l'agitation du réveil et dont la respiration est devenue surtout abdominale : d'où l'inversion des courbes (1).

Cette inversion est des plus notables en O, période qui correspond à un cri prolongé déterminant une ascension extrême du tracé de la fontanelle.

A ce moment, la pression intra-abdominale est brusque-

(1) Dans la respiration brusque et exagérée et particulièrement lors des cris, de la toux, etc., les tracés fournis par deux pneumographes appliqués, l'un au thorax, l'autre à l'abdomen, sont inverses, la courbe respiratoire thoracique étant intervertie. Le professeur Bert a déjà signalé, chez le chien, un antagonisme de ce genre « entre le jeu de la partie inférieure et celui de la partie supérieure du thorax (a), » quand la respiration est purement diaphragmatique.

Dans un remarquable travail sur la Pneumographie (b), le Dr Mocquot a appelé l'attention sur la production de cette inversion chez l'homme.

Inscrivant simultanément la respiration de trois manières, au moyen de deux pneumographes fixés à la cage thoracique et à l'abdomen, et par l'intermédiaire d'un réservoir auquel aboutit un tube, dans lequel respire le sujet de l'expérience (c), l'auteur a constaté que les trois courbes parallèles dans la respiration normale changent de nature, quand la respiration devient brusque et saccadée.

Le parallélisme existe encore entre les tracés de la respiration abdominale et ceux du réservoir, les derniers faisant foi ; mais le tracé thoracique est en opposition avec les deux autres. Nous avons nous-même souvent vérifié cette inversion de tracés. Par quel mécanisme se produit-elle, dans ces circonstances? Voici l'explication qu'en a donnée Mocquot :

Les muscles abdominaux se contractant vivement, refoulant subitement et avec force le diaphragme dans le thorax, il en résulte une augmentation considérable de pression thoracique. « Cette augmentation de pression produit deux effets simultanés : *dilatation du thorax* et expulsion au dehors d'une certaine quantité d'air (d). » La descente de la courbe respiratoire thoracique *en expiration* en est la conséquence. Son ascension en inspiration s'explique par un mécanisme inverse. Le diaphragme, qui a été violemment refoulé, se contracte énergiquement et, en s'abaissant, entraîne les poumons, tandis que la cage thoracique, distendue par l'acte précédent, revient sur elle-même : l'inspiration est uniquement produite par la contraction du diaphragme.

(a) P. Bert, *Leçons sur la physiologie comparée de la respiration*, Paris, 1870.

(b) G. Mocquot, *Essai de pneumographie, pour servir à l'étude des maladies des enfants*. Thèse, Paris, 1875.

(c) Un deuxième tube, partant de la bonbonne, aboutit à un tambour enregistreur, influencé par les variations de pression ; dans la bonbonne, pression moindre en inspiration, plus forte en expiration : d'où descente de la plume dans le premier cas, ascension dans le second.

(d) Mocquot, *loc. cit.*, p. 21.

ment élevée, à la suite des contractions spasmodiques des muscles abdominaux ; la pression intra-thoracique monte de son côté, par suite du refoulement subit du diaphragme. Toutes les conditions sont donc réunies pour refouler le sang de l'aorte et des veines caves dans les vaisseaux périphériques. Ainsi s'explique la tension si marquée de la fontanelle, conséquence de l'accroissement de la turgescence cérébrale.

Dans le soupir et dans le bâillement, l'appareil explorateur nous a permis de constater aussi des soulèvements considérables de la fontanelle.

Nous avons étudié également l'influence de la succion, chez l'enfant qui tète, sur les battements de la fontanelle. Les tracés qu'on obtient, dans ce cas, sont très-variables, suivant les instants.

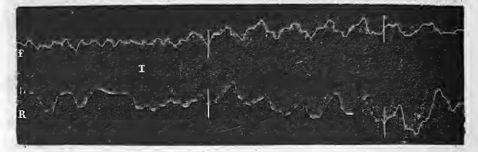


Fig. 173. — Battements de la fontanelle d'un enfant de six semaines, pendant la succion (ligne F) et respiration thoracique (ligne R), enregistrées simultanément.

La figure 173 correspond au moment où l'on donne le sein à l'enfant. La troisième ondulation respiratoire, qui offre un plateau assez prononcé, se rapporte au moment où l'enfant saisit le sein. En T, il commence à téter. Nous voyons aussitôt la ligne supérieure, qui représente les battements de la fontanelle, changer d'aspect. Les petites oscillations, d'origine cardiaque, qui se montraient seules auparavant, avec quelques petites irrégularités, viennent se greffer à présent sur des ondulations plus prononcées, en rapport avec la respiration. Ces grandes ondulations sont de même sens que celles de la respiration thoracique représentée au-dessous, comme le montrent bien les repères.

La suite du graphique aurait montré de grandes modifications, les ondulations provoquées par la respiration sur le

tracé de la fontanelle allant en s'éteignant de plus en plus, à mesure que l'enfant tète avec moins d'énergie, de façon à ne plus laisser paraître à la fin que les oscillations cardiaques. L'accord des deux courbes de la fontanelle et de la respiration, que montre la figure 173, nous permet de conclure que, pendant la succion, la respiration était essentiellement thoracique. Nous voyons, en outre, qu'elle ne s'arrêtait pas pendant la succion, et que l'inspiration coïncidait avec cette dernière.

Nous avons pu enregistrer également les modifications imprimées aux battements de la fontanelle et à sa tension par les *variations d'attitude* auxquelles on soumettait l'enfant. Pour obtenir ces modifications aussi pures que possible, et sans qu'elles puissent etre altérées, dans l'exécution de ces changements de situation, par les cris ou les mouvements de l'enfant, il était à désirer que celui-ci fût en quelque sorte passif. Aucun état ne pouvait nous être plus favorable, sous ce rapport, que le sommeil. C'est en effet le moment que nous avons choisi.

La figure 174 représente le tracé des mouvements de la fontanelle correspondant à trois attitudes différentes. Les modifications qu'elles ont amenées nous ont paru fort intéressantes.

En H, l'enfant dort avec calme ; il est couché sur les genoux de sa mère. De même que dans la figure 171, on ne distingue à ce moment que des oscillations de nature cardiaque.

A l'endroit indiqué par une flèche renversée, on baisse la tête de l'enfant : aussitôt, la fontanelle se tend fortement, ainsi que l'indique l'ascension considérable du tracé de ses mouvements. Après quelques secousses irrégulières, au milieu desquelles il est difficile de distinguer la pulsation cérébrale, la ligne s'abaisse notablement, pour se maintenir ensuite à un niveau moins élevé, supérieur toutefois à celui de l'attitude précédente, dans laquelle l'enfant était en position horizontale. Les oscillations déterminées par la systole du cœur se détachent nettement ; mais leur caractère n'est plus le même ; leur élévation est bien moindre, ce qui indique une augmentation considérable de la tension intra-crânienne.

L'enfant ayant été maintenu, près d'un quart de minute, en

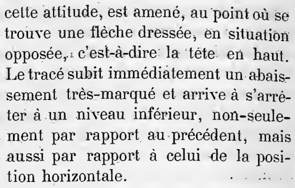


Fig. 174 — Tracé des modifications des battements de la fontanelle d'un enfant de sept semaines, sous l'influence des attitudes.

cette attitude, est amené, au point où se trouve une flèche dressée, en situation opposée, c'est-à-dire la tête en haut. Le tracé subit immédiatement un abaissement très-marqué et arrive à s'arrêter à un niveau inférieur, non-seulement par rapport au précédent, mais aussi par rapport à celui de la position horizontale.

A la suite de ce dernier changement d'attitude, les oscillations qui répondent à l'influence cardiaque ont repris leur ampleur primitive, laquelle accuse une diminution de la pression intracrânienne.

En somme, tension de la fontanelle au maximum quand la tête est abaissée ; moins forte en position horizontale ; moins forte encore la tête étant élevée.

Dans la première attitude, la pesanteur agit comme cause favorable sur l'afflux du sang artériel, comme cause défavorable sur l'écoulement veineux : la turgescence encéphalique doit donc être augmentée.

Dans l'attitude inverse, qui est celle de la station debout, la pesanteur entrave, dans une certaine mesure, la progression vers l'encéphale de l'ondée sanguine artérielle, tandis qu'elle favorise le retour du sang veineux vers l'oreillette droite : la turgescence de l'encéphale doit donc diminuer.

Enfin, en situation mixte, en d'autres termes dans la position horizontale, la turgescence est intermédiaire, toutes choses égales d'ailleurs.

Ces trois états différents se lisent, en

effet, sur le graphique que nous avons analysé (1). Nous avons répété à diverses reprises ces variations d'attitude sur le même sujet, et pendant tout ce temps il a pu continuer à dormir avec calme.

L'encéphale est-il seul le siége de changements de volume, à la suite de ces oscillations de pression; les vaisseaux situés dans la cavité crânienne, en dehors de la substance nerveuse, éprouvent-ils aussi des variations de calibre, et dans quelle mesure? — C'est ce qu'il ne nous est pas permis de juger dès à présent. Peut-être les expériences sur les animaux pourront-elles nous donner des renseignements à cet égard.

III. — Mouvements observables au crane et au rachis dans divers cas morbides.

Les mouvements dépendant des variations de réplétion vasculaire des organes contenus dans la cavité céphalo-rachidienne sont observables dans diverses circonstances pathologiques au crâne et à la colonne vertébrale. On les rencontre particulièrement au crâne, dans l'encéphalocèle, le cancer ou la carie syphilitique des os du crâne, les fractures de la voûte, récentes ou anciennes, enfin, à la suite de la trépanation pratiquée par la main du chirurgien. On peut les observer également au rachis, dans le *spina bifida*.

A. *Mouvements observables au crâne*.— Les diverses tumeurs que nous avons énumérées sont le siége d'un double *mou-*

(1) Outre les variations du *niveau général*, on observe aussi, dans les différentes attitudes, des variations d'*amplitude des oscillations* cardiaques : la plus grande turgescence de l'encéphale s'accompagne nécessairement de variations moins amples, et réciproquement. On a déjà insisté dans le mémoire nº I sur ce genre de phénomène, et la figure 174 en donne un bon exemple.

vement qui correspond à la fois, d'une part aux battements du pouls, d'autre part aux mouvements respiratoires, aux efforts, aux cris, à la toux, à l'éternuement, etc. Ces mouvements sont bien moins accentués, et peuvent même ne plus être perceptibles, ni à l'œil, ni à la palpation, pendant le repos et le sommeil.

Les perforations de la calotte crânienne, amenées par le développement d'affections cancéreuses ou autres, et surtout celles qui résultent de fractures, peuvent mettre à nu la dure-mère ou le cerveau lui-même. Dans ces cas, aussi bien qu'à la suite de l'opération du trépan, on peut observer les deux ordres de mouvements (1) dont il a déjà souvent été question, soit directement sur le cerveau mis à nu, soit par l'intermédiaire de la dure-mère.

Une perte de substance de la voûte du crâne, ou une trépanation, permettent encore, lorsque le malade est rétabli, d'observer les mouvements cérébraux à travers la peau qui recouvre l'ancienne perforation. Dans un cas de ce genre, l'adulte présente une sorte de fontanelle artificielle, qui le replace, à cet égard, dans les conditions premières de son existence.

Nous avons été assez heureux pour rencontrer un cas rentrant dans cette dernière catégorie. C'est celui d'un homme de trente ans, qui tomba, à quinze ans, du grand mât sur le pont du navire où il servait en qualité de mousse. Il en résulta une fracture, avec perte de substance très-étendue de la partie gauche du frontal.

B... était sujet, quand nous le vîmes, à des accidents épileptiformes, pour lesquels il avait été admis, à diverses reprises, dans plusieurs hôpitaux de Paris. Entré dans le service du professeur Broca, à l'hôpital des Cliniques, le malade présentait, à cette époque, au niveau de la bosse frontale du côté gauche, une vaste dépression à bords assez irréguliers, ayant à peu près l'étendue d'une pièce de 5 francs en argent.

(1) Roser a observé deux fois l'absence de ces mouvements, dans le cas de dénudation de la dure-mère. Nous avons constaté parfois le même fait, à la suite de trépanations pratiquées sur le chien. Nous essayerons, le moment venu, d'interpréter cette apparente anomalie.

La peau qui offre, à cet endroit, des stries de tissu inodulaire, est cependant molle, et l'excavation, très-prononcée, quand le malade est debout, l'est moins lorsqu'il est couché. Elle se gonfle dans les efforts, quand le malade souffle ou lorsqu'il tousse, surtout quand il penche la tête en avant. Non-seulement la dépression peut alors disparaître, mais, à la place de l'excavation existant un instant auparavant, on peut voir la peau arriver au niveau de celle des parties voisines ou même bomber assez pour offrir l'apparence d'une petite tumeur.

Le professeur Broca voulut bien nous autoriser à recueillir l'inscription graphique de ces changements de niveau. Nous eûmes recours au nouvel explorateur à tambour (1) du professeur Marey, dont nous appliquions le bouton sur la région correspondant à la perte de substance osseuse.

En même temps, nous prenions le tracé du pouls radial, au moyen du sphygmographe à transmission, tandis qu'un

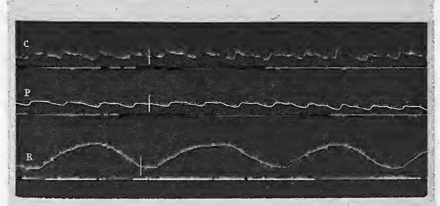


Fig. 175. — Graphique des mouvements communiqués aux parties molles qui recouvrent le cerveau, chez un individu ayant subi une perte de substance du crâne.
C. Tracé frontal avec repères horizontal et vertical.
P. Pouls radial, avec repères.
R. Respiration avec repères. (Ligne descendante : inspiration; ligne ascendante : expiration.)

pneumographe appliqué sur la cage thoracique nous donnait la courbe respiratoire. Les tracés furent recueillis (2) sur le

(1) *Voir* pour sa description, *Physiol. exp.*, Travaux du laboratoire du professeur Marey, 1875, p. 32.

(2) Ils furent obtenus le 18 juin et le 10 juillet 1875, avec l'assistance du Dr François-Franck.

malade assis ou debout, la tête étant légèrement inclinée en avant.

Dans les conditions ordinaires, le malade étant tranquille, sa respiration calme et régulière, nous remarquons que les systoles cardiaques traduisent seules leur influence sur le tracé frontal que reproduit la première ligne de la figure 175.

On ne peut y découvrir de modifications imprimées par la respiration, représentée sur la ligne inférieure. Le pouls (ligne moyenne) nous montre un dicrotisme que nous retrouvons encore dans le tracé cérébral.

La première partie de la figure 176 reproduit les mêmes effets; mais le malade vient-il à faire un effort, ainsi que nous l'y engageons, aussitôt la scène change.

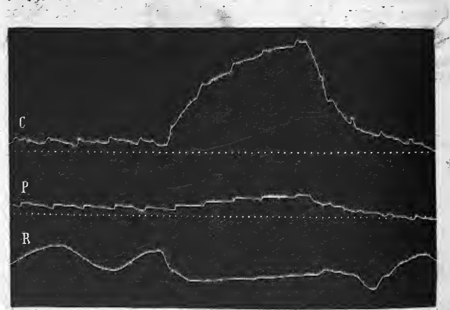


Fig. 176.— Graphique des mouvements imprimés aux parties molles qui recouvrent une perte de substance crânienne, pendant l'effort.

C. Tracé frontal, avec ligne de repère pointillée.

P. Pouls radial, avec ligne de repère.

R. Respiration. La descente de la courbe correspond à l'inspiration; son ascension, à l'expiration.

A la deuxième ondulation de la courbe respiratoire succède une ligne presque horizontale, qui marque la durée de l'effort.

La partie correspondante du tracé du pouls radial nous montre une série de pulsations ascensionnelles en escalier,

qui indiquent, d'une manière non douteuse, l'augmentation de la pression artérielle, dont nous retrouvons les effets dans l'ascension si notable du tracé frontal (1), qui permet encore de distinguer quelques soubresauts en rapport avec la pulsation cardiaque.

Aussitôt que cesse l'effort, nous pouvons constater, en même temps que la reprise de la respiration, la descente assez brusque du tracé cérébral, aussi bien que l'abaissement de la tension artérielle, dans le tracé de la radiale. Les deux lignes tombent même un peu au-dessous de leur niveau primitif (2).

La suite du tracé, après cessation de l'effort, aurait montré que, la respiration étant redevenue calme, l'explorateur des battements encéphaliques n'a plus indiqué que l'influence cardiaque.

Nous pouvons résumer cette observation en disant que *l'influence respiratoire* n'apparaît sur le tracé cérébral que *dans le cas de respiration exagérée*, dans l'effort, etc. L'*influence cardiaque*, étant *seule marquée dans la respiration normale*, se traduit, dans ce cas, par une série d'oscillations parallèles à celles du pouls, dont elles reproduisent le dicrotisme.

B. *Mouvements observables au rachis.* — Les tumeurs désignées sous le nom de spina-bifida ou hydrorachis, qui occupent le plus souvent la région lombaire ou sacrée, sont encore le siége de mouvements d'expansion et de retrait. Les auteurs sont d'accord pour dire que la tumeur se distend pendant les cris ou les efforts d'expiration de l'enfant, et qu'elle semble s'affaisser pendant l'inspiration. Ces mouvements sont évidemment transmis aux parois de la poche par le liquide céphalo-rachidien refoulé par l'augmentation du calibre vasculaire, consécutive à l'expiration.

(1) L'augmentation de la pression artérielle n'est sans doute pas seule en cause, dans ce tracé, et il faut tenir compte également de l'élévation de pression dans les veines intra-crâniennes.

(2) Après quelques pulsations, ce niveau est de nouveau graduellement atteint. Cet abaissement de la courbe, après l'effort, au-dessous du niveau du début, tient, ainsi que l'a établi Marey (*Physiol. de la circulat.*, p. 296), au reflux exagéré du sang, des artères périphériques vers l'aorte subitement décomprimée, laquelle se remplit au détriment des artères dans les premiers instants qui font suite à l'effort.

Follin, et les auteurs en général, ne parlent pas de battements coïncidant avec le pouls, comme on les observe dans les tumeurs, que présente la boîte crânienne, l'encéphalocèle par exemple. Cruveilhier, qui a observé plusieurs cas de spina-bifida dans la région lombaire, dit qu'il n'a pu y découvrir de mouvements isochrones aux battements du pouls, ce qu'il explique par l'absence d'artères volumineuses dans la moelle épinière (1).

Il n'est pas douteux cependant que des mouvements peu marqués, se répartissant sur une large surface, aient pu échapper à l'œil ou à la palpation. Nous ne prétendons cependant rien affirmer touchant la réalité de battements de ce genre dans l'hydrorachis (2).

Nous aurons à revenir sur ce point, quand nous nous occuperons des trépanations pratiquées à la région lombaire.

IV. — Expériences de trépanation.

Nous diviserons en trois catégories les expériences que nous avons faites dans le but d'étudier les mouvements de l'encéphale et du liquide céphalo-rachidien.

A) Dans la première série d'expériences, la trépanation était pratiquée *sur les parois crâniennes*.

B) Dans la seconde, elle était pratiquée *sur les parois du rachis*.

C) Enfin, dans la dernière série, la trépanation était faite concurremment *au crâne et au rachis*.

A. *Trépanations crâniennes.*

A l'exemple de Magendie (3), de Bourgougnon (4) et des expérimentateurs qui les ont suivis dans cette voie, nous

(1) Cruveilher, *Anat.*, 4e édition, t. III, p. 362.

(2) Notre intention était d'avoir recours à l'inscription graphique, pour contrôler les mouvements qu'on observe dans le spina-bifida; mais nous n'avons pu, dans le cours de nos recherches, rencontrer un cas de ce genre.

(3) *Recherches sur le liquide céphalo-rachidien*, 1842.

(4) *Recherches sur les mouvements du cerveau.* Th., Paris, 1839.

avons pratiqué une ouverture arrondie à la boîte crânienne, pour visser ensuite à l'orifice ainsi obtenu un tube de verre dont la partie inférieure est fixée dans une garniture en laiton munie d'un pas de vis et que deux ailettes latérales permettent de saisir solidement (1).

Le tube placé, on y verse de l'eau, et les oscillations du niveau du liquide présentent un synchronisme parfait avec le pouls artériel, en même temps que l'influence respiratoire s'accuse par des excursions étendues de la colonne liquide.

Voulant inscrire à distance ces variations de niveau, en même temps que les battements du cœur et les mouvements respiratoires, nous avons pendant quelque temps été déçu dans notre attente : les oscillations ne se transmettaient que très-faiblement à la plume du tambour à levier, et nous avons dû tâtonner assez longuement pour arriver à reconnaître la nécessité de substituer un tube assez large au tube étroit que nous avions tout d'abord employé.

Avec des tubes de fort calibre, contenant une certaine quantité d'eau et dont l'orifice supérieur était fermé par un bouchon de caoutchouc traversé par l'origine du tube de transmission, nous avons paré aux causes de déformation des tracés résultant de la vitesse acquise du liquide dans les tubes étroits et longs (2).

Ces larges trépanations ont encore eu l'avantage de supprimer une conséquence bien fâcheuse et presque forcée des trépanations de faible diamètre, je veux parler de la hernie du cerveau qui vient jouer le rôle d'obturateur à l'orifice inférieur du tube d'exploration.

Cette hernie est bien en effet la cause de la suppression des oscillations, car dans deux expériences récentes sur le chien, les oscillations du liquide, d'abord très-amples, s'étant pro-

(1) Hammond et Weir Mitchell ont modifié, à certains égards, le tube employé par les physiologistes que nous avons cités. Ils en ont fermé l'orifice inférieur par une membrane de caoutchouc qui vient au contact de la dure-mère. Leur tube de cuivre rempli de liquide se termine par un tube de verre gradué qui permet d'en apprécier les changements de niveau. Ils ont appelé céphalo-hémomètre cet appareil dont ils se sont servis pour étudier l'influence du chloral sur l'encéphale. (*V.* Hammond, Des effets physiol. et des usages thérap. de l'hydrate de chloral, *New-York medical Journal*, fév. 1870.)

(2) *V.* pour les détails, Mémoire I, p. 14.

gressivement atténuées et ayant fini par disparaître, je dévissai le tube et constatai un véritable bouchon fongueux formé par la substance cérébrale herniée : à peine ce bouchon eut-il été refoulé avec le doigt, que nous vîmes le liquide céphalo-rachidien faire brusquement irruption entre le cerveau réduit et le rebord de l'os, sur tout le pourtour de la trépanation. Le tube ayant été revissé, les oscillations reparurent pour diminuer peu à peu, à mesure que se reproduisait la hernie cérébrale (1).

Cette hernie du cerveau, fréquente avec des trépanations de petit diamètre, se développe fatalement et devient énorme quand on a entamé la substance cérébrale. Flourens avait déjà noté le fait et les chirurgiens savent bien que chez l'homme les pertes de substance du crâne avec lésion du cerveau s'accompagnent aussi de hernie de la substance nerveuse (2).

Ayant donc adopté les trépanations de large diamètre, nous avons opéré dans deux conditions différentes : tantôt la dure-mère était intacte, tantôt (et c'était le cas le plus fréquent) cette membrane avait été préalablement enlevée sur toute l'étendue de la trépanation.

Pour explorer les mouvements du cerveau, la dure-mère étant intacte, nous nous sommes servi soit du tube à niveau variable décrit plus haut, soit d'un tambour sur la membrane duquel était fixé un petit bouton de liége, appareil analogue à celui qui nous a servi pour étudier les mouvements des fontanelles chez les enfants nouveau-nés.

La transmission s'opérait, comme de coutume, quel que fût le procédé employé, par un tube de caoutchouc aboutissant au tambour à levier enregistreur de Marey. Ce mode d'inscription nous a permis de recueillir simultanément les courbes

(1) Un fait bien paradoxal en apparence, signalé par Flourens (*loc. cit.*, p. 351), vient encore à l'appui de notre explication. La ligature d'une partie des troncs artériels du cerveau rend les mouvements de cet organe plus manifestes. Flourens en conclut que ces mouvements sont surtout sous la dépendance de l'action veineuse. Pour nous, ce phénomène s'explique par la moindre turgescence de l'encéphale, dont les voies d'apport sanguin sont diminuées. Le cerveau ne s'applique plus dès lors aussi étroitement contre la voûte crânienne, et l'œil saisit plus nettement ses déplacements.

(2) S. Laugier, article ENCÉPHALE : Plaies du cerveau, *Dict. de médecine et de chirurgie prat.*

respiratoire, cardiaque, carotidienne, et de déterminer, en superposant ces différents tracés, les rapports des expansions et resserrements du tissu encéphalique avec chacun d'eux.

Les animaux, chiens et lapins, qui ont servi à nos expériences, ont toujours été préalablement anesthésiés par le chloroforme, le plus souvent associé à la morphine, d'après la méthode si heureusement inaugurée par le professeur Cl. Bernard. Quelquefois nous avons immobilisé les sujets en expérience avec le curare, en les soumettant à la respiration artificielle.

§ 1. — Étude des oscillations cérébrales, en rapport avec la systole du cœur et la respiration.

Nos expériences ont porté, comme nous l'avons dit, sur le lapin et sur le chien. Ce dernier animal, à cause de sa plus grande taille, donne plus nettement les deux ordres de mouvements qui traduisent les changements de la pression artérielle, c'est-à-dire les mouvements rhythmés avec le pouls et ceux qui correspondent à la respiration.

Voici en effet l'un des types recueillis sur le lapin (fig. 177).

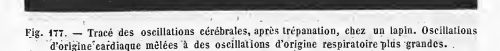


Fig. 177. — Tracé des oscillations cérébrales, après trépanation, chez un lapin. Oscillations d'origine cardiaque mêlées à des oscillations d'origine respiratoire plus grandes.

On reconnaît bien sur les courbes respiratoires de petits soulèvements qui leur donnent une forme dentelée; mais il faut avouer que les petites variations, en rapport avec les systoles cardiaques, sont trop peu accusées pour qu'on en puisse faire une analyse rigoureuse (1).

Les tracés fournis par le chien sont au contraire beaucoup

(1) Si ces petites oscillations se lisent difficilement sur un tracé, on comprend qu'elles soient à peine perceptibles à la vue : on s'explique dès lors que Flourens, ayant fait toutes ses expériences sur le lapin, n'ait pu admettre que les mouvements liés à la respiration.

plus nets ; la figure 178 nous en montre un bon exemple :

La ligne supérieure nous offre le tracé des oscillations que nous appellerons, pour plus de commodité, *oscillations cérébrales*. On y observe des oscillations rhythmées avec le pouls

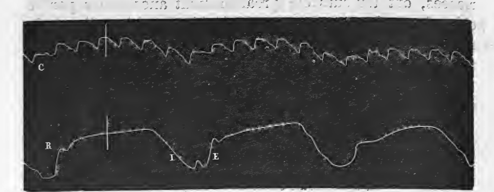


Fig. 178.—Tracé des oscillations cérébrales (ligne C) et de la respiration (ligne R) recueillies simultanément chez le chien ; — I, inspiration ; — E, expiration. — Repères verticaux.

et surajoutées à des grandes ondulations respiratoires : le rapport de ces dernières avec les mouvements respiratoires est facile à déterminer, en ayant égard à la superposition des deux courbes : on voit que le volume du cerveau diminue pendant l'inspiration I et augmente pendant l'expiration E.

Dans l'exemple précédent, la respiration est assez calme. Aussi les variations du calibre des vaisseaux encéphaliques produites par les systoles cardiaques sont-elles parfaitement distinctes sur le tracé cérébral C. Il n'en est pas de même quand la respiration s'accélère ou devient anxieuse, quand l'animal crie : comme on le voit dans la figure 179, les ondulations respiratoires plus fréquentes, plus brusques, sont à peine dentelées, par moments, par les oscillations d'origine artérielle.

Quelquefois, au contraire, quand les mouvements respiratoires sont lents et peu accentués, les ondulations respiratoires disparaissent presque complétement du tracé des oscillations cérébrales, comme nous le verrons figure 183, p. 373. On n'y retrouve plus que les variations du calibre des vaisseaux encéphaliques en rapport avec la fonction cardiaque. Nous sommes porté à croire que dans les conditions normales, chez un animal intact, la respiration étant très-calme, les choses

doivent habituellement se passer ainsi. C'est ce que nous avons du reste observé déjà, en explorant la fontanelle de l'enfant nouveau-né.



Fig. 179. — Tracé des oscillations cérébrales d'un chien, dont la respiration est haletante (1).

Nous n'insisterons pas ici sur le mécanisme des variations de volume du cerveau dans leurs rapports avec les fonctions cardiaque et respiratoire; il ne s'agit en effet que d'un cas particulier de la règle applicable à tous les organes vasculaires.

On trouvera dans le mémoire de François-Franck (2) les considérations relatives à l'interprétation de ces variations. Les recherches de Piégu, celles de Buisson, de Fick, de Mosso, de Franck, concordent toutes à rapporter les variations rhythmées avec le cœur aux dilatations et resserrements alternatifs des vaisseaux périphériques, et à présenter les courbes qui expriment ces variations comme la conséquence de la *totalisation* de toutes ces actions partielles.

Nous avons nous-même insisté à plusieurs reprises, dans les pages précédentes, sur la provenance *artérielle* de ces oscillations : l'expérience suivante vient à l'appui de ces conclusions.

(1) L'animal qui a fourni ce tracé était un chien de petite taille, dont le cerveau se trouvait bien plus affaissé que chez tous les autres sujets de nos expériences, la surface des hémisphères cérébraux n'étant point accolée à la voûte crânienne comme cela avait lieu le plus souvent dans les autres cas. Cette particularité permit une grande amplitude des oscillations. La respiration de l'animal étant rapide et très-ample, les oscillations cérébrales qui en résultèrent ont donné un tracé qui peut aussi bien passer pour celui de la respiration elle-même.

Ces oscillations sont représentées par une série d'élévations, dont chacune comprend une expiration suivie d'une inspiration, la ligne d'expiration étant à la fois plus longue et plus oblique, la ligne d'inspiration plus courte et plus abrupte.

Sur quelques-unes des lignes d'expiration, on remarque de très-légères ondulations d'origine cardiaque.

(2) Mémoire I du présent volume.

Nous lions l'une des carotides sur un chien. Le tracé des oscillations suscitées par la systole du cœur en est à peine modifié au moment de la ligature; au bout de quelques instants, le tracé reprend son niveau primitif.

La ligature de la carotide du côté opposé apporta une diminution plus notable; cependant, grâce au polygone artériel de Willis, quelques minutes plus tard, les oscillations qui étaient devenues d'abord un peu plus fréquentes, à la suite d'une modification du rhythme cardiaque, qui a déjà été signalée par plusieurs auteurs, avaient repris, à peu de chose près, leur hauteur primitive.

La ligature d'une des vertébrales amena ensuite une diminution considérable des oscillations cérébrales, le cerveau ne recevant plus de sang à ce moment que par la dernière artère vertébrale.

Celle-ci, à son tour, fut liée. Les oscillations furent aussitôt absolument supprimées. Le cerveau était, dès lors, privé de toutes les voies normales qui lui amènent le sang (1).

A partir de la ligature de la quatrième artère, le tracé cérébral n'offrit plus qu'une ligne horizontale, la respiration elle-même étant devenue trop faible pour traduire son influence. Quelques vagues et faibles ondulations apparaissaient bien encore de loin en loin; leur production dépendait sans doute de modifications de la pression veineuse (*V.* page 28).

Quant aux rapports des grandes ondulations du tracé cérébral avec les mouvements respiratoires, nous devons, en

(1) A la suite de cette opération, un lapin eût fatalement succombé. Le chien sur lequel nous opérions continua à vivre pendant plusieurs heures. Ce fait étrange de prime abord avait déjà été observé par A. Cooper (*a*) à la suite des ligatures pratiquées sur les carotides et les vertébrales du chien. Des résultats identiques furent obtenus par J. Ehrmann (*b*). La persistance de la vie, dans ces circonstances, ne peut s'expliquer que grâce à des anastomoses existant entre la partie supérieure des troncs liés et les artères voisines (*c*).

(*a*) *Gazette médicale*, 1838.

(*b*) *Recherches sur l'anémie cérébrale*, Strasbourg, 1858, p. 36, et *Des effets produits sur l'encéphale par l'oblitération des vaisseaux artériels*, Paris, 1860.

(*c*) Ces anastomoses existeraient entre des rameaux des artères thyroïdiennes inférieure et supérieure d'une part, entre la cervicale ascendante et des rameaux se rattachant à la carotide externe d'autre part, d'après les résultats d'une injection pratiquée par A. Cooper. Panum cite, de son côté, des anastomoses existant entre des branches des vertébrales et des branches spinales.

raison même des remarques précédentes; les assimiler aux courbes respiratoires de la tension artérielle.

L'exemple suivant (fig. 180) fera bien saisir ces rapports dans les conditions de respiration ordinaire (Type thoracique).

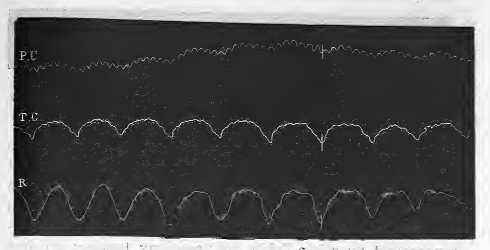


Fig. 180. — P. C. Pression carotidienne avec courbes respiratoires.
T. C. Changements de volume du cerveau (courbes respiratoires et cardiaques).
R. Tracé de la respiration. — Tracés recueillis simultanément. — On voit les trois courbes superposées s'accorder dans leurs différentes phases. Abaissement de la ligne dans l'inspiration, élévation dans l'expiration.

Chaque abaissement des courbes de la ligne R (respiration) correspond à l'inspiration. On voit en même temps diminuer le volume du cerveau T C et s'abaisser la pression artérielle P C.

Mais les variations de la tension artérielle sont-elles seules en cause dans les changements du volume du cerveau rhythmés avec la respiration? Nous pensons qu'il faut aussi faire une part aux degrés variables de réplétion veineuse. L'expérience suivante nous permet en effet de considérer comme évidente l'intervention veineuse.

Nous avons supprimé l'afflux du sang artériel dans le cerveau (du moins pendant quelques instants), en comprimant le tronc brachio-céphalique, la carotide gauche ayant été liée au préalable.

Cette manœuvre a provoqué (soit par la compression d'un tronc nerveux voisin du tronc artériel comprimé, soit par toute autre cause) des mouvements respiratoires précipités

et violents : or, le tracé (fig. 181) nous montre des oscillations cérébrales rhythmées avec les mouvements respiratoires saccadés qu'avait provoqués la compression du tronc brachio-céphalique (1).

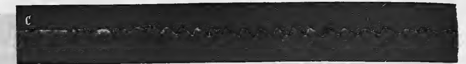


Fig. 181. — Oscillations cérébrales purement *veineuses*, en rapport avec des mouvements respiratoires saccadés, provoqués par la suppression brusque de la circulation artérielle encéphalique.

Ces oscillations veineuses, subordonnées aux changements de la pression intra-thoracique, doivent donc évidemment entrer en ligne de compte dans les variations de pression intra-crânienne. Nous savons par les recherches successives dont Barry a pris l'initiative et qui ont été depuis le commencement du siècle l'objet de nombreux travaux (2), que

(1) On pourrait nous objecter, il est vrai, une compression insuffisante ayant permis à une certaine quantité de sang artériel d'arriver encore à l'encéphale. Nous nous sommes mis à l'abri de cette critique en liant successivement les deux artères carotides et les deux vertébrales : les oscillations se sont produites dans ce cas avec la même intensité que dans l'expérience précédente. Liant ensuite les deux jugulaires, nous vîmes les mêmes phénomènes se produire encore, mais notablement atténués.

(2) L'afflux du sang veineux vers le thorax, et la diminution de la pression carotidienne pendant l'inspiration, se rattachent à un phénomène sur lequel Barry le premier a sérieusement appelé l'attention : nous voulons parler de l'aspiration thoracique amenée par la dilatation du médiastin, laquelle dépend de l'abaissement du diaphragme et surtout de l'élasticité du poumon, qui tend toujours à revenir sur lui-même. Les effets de l'aspiration veineuse sont facilités encore, comme on le sait, par la présence des gaînes fibreuses qui maintiennent béantes la plupart des veines, à leur entrée dans le thorax. La courbe manométrique de la pression carotidienne de la figure 180 montre bien également l'abaissement de la pression artérielle déterminé par l'aspiration thoracique. Dans le cas d'inspiration très-profonde, la pression peut encore baisser d'une façon bien plus marquée. En expiration, sous l'influence de la diminution de l'aspiration thoracique (*a*), la pression augmente dans les artères, et le cours du sang veineux se trouve ralenti. Ainsi s'expliquent les oscillations cérébrales d'origine respiratoire, dont la montée coïncide avec l'expiration et la dilatation encéphalique, la descente avec l'inspiration et le retrait de l'encéphale ; ces oscillations peuvent d'ailleurs, comme nous l'avons dit, absolument disparaître, quand la respiration est parfaitement calme.

(*a*) D'après Donders, la pression dans le médiastin est négative, non-seulement en inspiration, mais encore, quoique dans une plus faible mesure, en expiration. Cette aspiration, due à l'élasticité pulmonaire, peut disparaître, sous l'influence de grands efforts d'expiration.

l'inspiration constitue une cause d'accélération du courant veineux vers les cavités cardiaques, l'expiration une cause de ralentissement.

Il nous reste à signaler une modification que nous avons observée assez fréquemment, dans les oscillations respiratoires, quand la respiration était à la fois large et prolongée.

Tandis que dans la respiration ordinaire, et surtout dans la respiration rapide, la descente de l'ondulation cérébrale correspond exactement à l'inspiration, sa montée se rattachant à l'expiration, il n'en est plus de même quand les mouvements respiratoires sont larges et prolongés. Les oscillations cérébrales présentent alors un type mixte, le niveau du liquide montant au début de l'expiration dans le tube explorateur pour baisser lorsqu'elle s'achève (1).

Parfois aussi le liquide s'abaisse au commencement de l'inspiration pour s'élever à la fin de cet acte (2).

Les oscillations déterminées par la respiration n'ont pas été envisagées de la même façon par tous les auteurs. Nous ne saurions passer sous silence, à cet égard, la manière de voir de Magendie et de Longet. Pour ces deux illustres physiologistes, si le liquide s'élève dans le tube vissé aux parois du crâne, pendant l'expiration, c'est qu'une partie du liquide cérébro-spinal renfermé dans la cavité rachidienne reflue de celle-ci dans la boîte crânienne sous l'influence du gonflement des plexus rachidiens, l'abaissement du liquide en inspiration se rattachant à la rentrée d'une quantité correspondante de liquide céphalo-rachidien du crâne dans le rachis.

Mais non-seulement le liquide sous-arachnoïdien n'afflue point dans le crâne lors de l'expiration, mais, ainsi que nous le verrons plus tard, une partie du liquide contenu dans la cavité crânienne se rend, à ce moment, dans la cavité rachidienne dont les parois présentent des parties extensibles.

(1) Dans ce cas, les modifications de la pression, sous l'influence de l'expiration prolongée, sont comparables à celles qu'entraîne l'effort, modifications dont le professeur Marey a donné l'interprétation : Sous l'influence de la compression subie par l'aorte, le sang est chassé vers les artères périphériques dont la tension s'élève et dont le débit devient par suite plus rapide. Il en résulte une diminution de volume de l'aorte qui, en se vidant, « perd de sa tension élastique, de telle sorte que l'influence qui pousse le sang vers la périphérie faiblit graduellement. Le maximum de tension ne se maintient donc pas dans les artères émanées de l'aorte, mais il décroît peu à peu, à mesure que décroît la tension des parois de l'aorte. » (Marey, *Physiol. circul. sang.*, p. 295.)

(2) On pourrait s'expliquer encore ces variations de pression dans l'inspiration prolongée. La diminution de l'écoulement artériel, pendant cet acte, entraînerait la réplétion de l'aorte, qui ne peut dépasser une certaine limite, au delà de laquelle l'élasticité des parois aortiques entre en jeu, pour favoriser l'écoulement artériel. A partir de ce moment, la pression des artères périphériques cesse de baisser.

Quand les oscillations cérébrales, et par conséquent aussi la pression artérielle, se trouvent modifiées à la fois par les deux actes respiratoires, le type mixte signalé par Einbrodt se trouve réalisé.

§ 2. Influence exercée sur les oscillations cérébrales par les anesthésiques.

En faisant respirer aux sujets de nos expériences les vapeurs du chloroforme, nous avons provoqué deux ordres de modifications des oscillations cérébrales.

Quand l'anesthésique est administré avec modération et pendant un certain temps, on voit la respiration se calmer sous son influence et les oscillations cérébrales se rattachant à cette fonction diminuer ou disparaître complétement. A mesure que les oscillations provoquées par la respiration s'éteignent, celles qui dépendent de la systole du cœur se prononcent davantage et deviennent moins nombreuses, ce qui dépend de la diminution de la fréquence cardiaque.

Les 2 figures suivantes rendent bien compte de ces modifications.

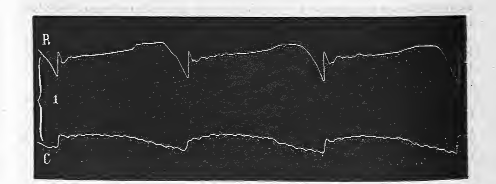


Fig. 182. — Graphique des oscillations cérébrales (ligne C) et de la respiration (ligne R) d'un chien non anesthésié.

Dans la première, l'animal pousse bruyamment et brusquement chaque expiration qui se prolonge encore pendant quelques instants. Les courbes respiratoires se retrouvent sur le tracé cérébral. Il faut noter toutefois que la

montée du liquide ne se prolonge pas pendant toute la durée de l'expiration, laquelle est suivie d'une inspiration de courte durée. Quant aux oscillations amenées par l'influence cardiaque, elles sont très-nombreuses et correspondent à plus de 200 pulsations par minute.

Un peu plus tard, sous l'influence du chloroforme, la scène a changé totalement d'aspect, ainsi que le montre la figure 183. La respiration est encore lente; mais, au lieu d'être saccadée, elle est absolument calme et se fait sans effort. L'inspiration et l'expiration sont d'égale durée. Il y a plus : les actes res-

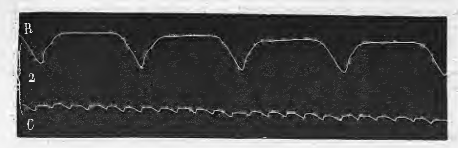


Fig. 183. — Graphique des oscillations cérébrales (ligne C) et de la respiration (ligne R) d'un chien anesthésié par le chloroforme.

piratoires sont séparés par une pause d'assez longue durée faisant suite à l'expiration, pause que nous avons presque toujours retrouvée chez le chien, dans la période d'insensibilité.

Le tracé des oscillations cérébrales ne traduit plus l'influence respiratoire : en examinant attentivement les oscillations d'origine cardiaque correspondant à l'inspiration, on remarque cependant qu'elles offrent un plateau un peu moins élevé que les autres. Ces oscillations, amenées par la systole du cœur, sont bien plus accentuées que dans la figure précédente; elles sont aussi bien moins nombreuses et ne correspondent plus qu'à cent pulsations par minute. La fréquence cardiaque a donc diminué de moitié sous l'influence du chloroforme (1).

(1) Il faut soigneusement distinguer de ces effets produits par l'action *anesthésique* du chloroforme, ceux qu'on observe au début de l'administration de cet agent, quand il n'exerce qu'une action irritante sur les premières voies.

On sait que, lorsqu'on fait respirer brusquement les vapeurs du chloroforme à un lapin, on voit généralement se produire un arrêt instantané de la respi-

Nous avons également étudié ce que deviennent les oscillations cérébrales sous l'influence du chloral : ce n'est plus, il est vrai, à un anesthésique véritable que nous avons affaire ici (1). L'animal est endormi ; mais il est sensible, quand la chloralisation n'est pas poussée trop loin, aux excitations intenses et se réveille quand on les provoque.

Injectant, à diverses reprises, 50 centigrammes d'hydrate de chloral, en solution assez étendue, dans la veine fémorale d'un chien (2), nous voyons, quelques instants après, la respiration

ration en même temps qu'un ralentissement et parfois un arrêt des battements du cœur (a). Ces phénomènes durent en moyenne de quelques secondes à une demi-minute, après quoi la respiration reprend et les battements du cœur s'accélèrent très-légèrement.

Nous avons observé sur un chien une susceptibilité analogue. La figure suivante rend compte de l'expérience. Dans la première partie du tracé la respiration est large et sa courbe se traduit en ondulations prolongées sur le tracé des oscillations du liquide intra-crânien. En Ch, une éponge imbibée de chloroforme est brusquement placée devant les narines de l'animal, qui aussitôt suspend sa respiration, arrêtant même une inspiration qu'il avait com-

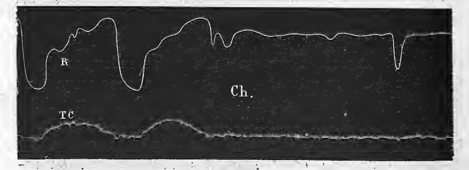


Fig. 184. — Graphique de la respiration (ligne R) et des oscillations cérébrales (ligne TC) modifiées en Ch. par l'administration brusque de chloroforme.

mencée. A partir de ce moment, la ligne inférieure ne montre plus que de faibles ondulations se rattachant aux pulsations des artères intra-crâniennes. Quelques instants plus tard apparaît une faible respiration. La suite du tracé aurait montré que la respiration ne s'est régulièrement rétablie qu'après environ une demi-minute.

(1) Voir Cl. Bernard, *Leçons sur les anesthésiques*, Paris, 1875, 10e leçon.

(2) Ainsi que le dit le professeur Cl. Bernard, « si la dose est un peu forte et si l'injection est faite rapidement, on tue subitement l'animal ; la mort se produit par arrêt du cœur, comme si ce muscle était directement atteint par

(a) Voir l'historique et la critique expérimentale de ces effets initiaux du chloroforme dans le Mémoire VI du présent volume par François-Franck.

s'arrêter, les contractions cardiaques diminuer d'intensité et de fréquence, et les courbes de la pression artérielle fournies par un manomètre enregistreur en communication avec la carotide présenter tout d'abord un abaissement considérable, avec ralentissement très-notable des battements du cœur, puis indiquer plus tard, quand l'action du chloral est établie, une pression artérielle faible, phénomène dû, ainsi que l'a montré le professeur Cl. Bernard, à la dilatation vasculaire périphérique.

Sous l'influence du chloral, nous voyons encore disparaître absolument du tracé cérébral les ondulations respiratoires : les ondulations cardiaques persistent seules. D'abord rares et espacées, ainsi que dans le tracé manométrique, elles reprennent peu à peu, bien qu'assez lentement, leur fréquence première.

§ 3. — Influence exercée sur les oscillations cérébrales par la respiration artificielle.

Il faut avant tout s'entendre sur le terme de respiration artificielle, celle-ci pouvant s'effectuer suivant deux modes :

1° Suivant le mode normal, c'est-à-dire par aspiration pleurale (1) ;

2° Par insufflation trachéale (2).

C'est ce dernier mode qui est généralement adopté dans

l'arrivée du chloral, au contact de la face interne de ses cavités. » Cet éminent physiologiste attire aussi l'attention sur ce fait que l'injection présente d'autant plus de danger qu'elle est faite plus près du cœur. Elle comporte bien plus de ménagements chez le chien que chez l'homme, bien plus encore sur des animaux tels que le lapin et le cochon d'Inde. Chez le chien même une dose égale injectée par la veine crurale ou par la jugulaire produira des accidents plus graves dans le dernier cas.

(1) C'est à ce mode que l'on a d'ordinaire recours pour ranimer les asphyxiés ou les noyés, soit en comprimant et abandonnant successivement à elle-même la cage thoracique, soit en élevant et abaissant d'une manière rhythmée les bras du sujet, ce qui produit un résultat analogue. Le spirophore proposé récemment par le Dr Woillez rentre aussi dans ces conditions.

(2) Ce mode est pratiqué non-seulement sur les animaux, mais encore sur les nouveau-nés n'ayant point encore respiré.

les laboratoires. C'est celui dont nous comptons nous occuper ici.

Dans la respiration pratiquée de la sorte, l'air est fortement propulsé dans la trachée et les bronches, au moment de l'inspiration, de façon qu'il arrive dans le poumon sous pression positive au lieu d'y être appelé par l'aspiration thoracique.

La quantité de sang contenu à ce moment dans les vaisseaux pulmonaires est moins considérable, le sang étant pour ainsi dire exprimé en dehors de l'organe, ce qui, dans les conditions de l'expiration par le mécanisme normal, se produit en expiration : les conditions sont donc ici renversées (1).

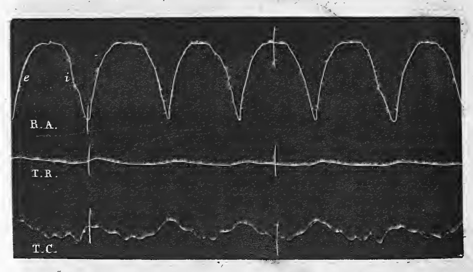


Fig. 185. — Tracé de la courbe respiratoire, déterminée par la respiration artificielle (ligne R A), recueilli en même temps que le tracé des oscillations du liquide rachidien (ligne T R) et que celui des oscillations du liquide crânien (ligne T C), sur un chien curarisé.

(1) C'est ce qu'avait déjà constaté le Dr Gréhant (*a*); c'est ce que vérifièrent aussi MM. Quincke et Pfeiffer (*b*) cités par le professeur Heger (*c*) qui nous a donné, au laboratoire du professeur Marey, la démonstration évidente du phénomène, en établissant la respiration, sur les poumons détachés d'un chien récemment sacrifié, non plus en se rapprochant des conditions normales, comme il l'avait fait d'abord, mais par insufflation trachéale : les phénomènes se trouvaient dès lors intervertis.

Dans l'inspiration amenée par l'insufflation trachéale, le poumon est en quelque sorte comprimé de dedans en dehors, entre les parois thoraciques et

(*a*) Gréhant, *Comptes rendus de la Société de Biologie*, 1870.

(*b*) *Archives de du Bois-Reymond et de Reichert*, 1871.

(*c*) P. Héger, *Expériences sur la circulation artificielle dans des organes isolés*, Thèse d'agrég. Bruxelles, 1873.

Nous avons fréquemment observé le renversement des oscillations cérébrales, sous l'influence de la respiration artificielle. La figure 185 en offre un exemple.

Nous ne considérerons, pour l'instant, dans cette figure, que la ligne supérieure et la ligne inférieure, dont la première correspond à la respiration artificielle. (Inspiration, ligne descendante ; expiration, ligne ascendante.)

La ligne inférieure est celle des oscillations cérébrales.

Laissant de côté les petites oscillations liées aux pulsations artérielles, bornons-nous à examiner les lignes onduleuses plus marquées qui correspondent à la respiration et qui nous intéressent seules, pour le moment. Nous voyons qu'avec l'expiration coïncide la descente du liquide contenu dans le tube fixé aux parois crâniennes, l'ascension de ce même liquide s'opérant pendant l'inspiration. C'est exactement le contraire de ce que nous avions observé dans la respiration naturelle.

§ 4. Influence exercée sur la pression intra-crânienne par les changements d'attitude.

Si, après avoir trépané le crâne d'un animal, on modifie son attitude, en l'amenant en situation verticale, on observe, indépendamment des symptômes qui se produisent à la longue et dont nous ne nous occuperons pas ici (1), des phénomènes tout à fait opposés, suivant la position de la tête de l'animal.

Quand elle est abaissée, on voit la dure-mère devenir rouge et proéminer à travers l'orifice crânien. Cette membrane

l'air insufflé dans les bronches. En expiration, il reprend son volume primitif. Il s'ensuit, qu'à la suite de la diminution de la pression intra-thoracique, l'aspiration exercée sur les vaisseaux qui se rendent au médiastin est plus considérable pendant l'expiration que pendant l'inspiration. C'est ce qu'a vérifié aussi le Dr Rosapelly (a) sur le chien, chez lequel il a constaté la diminution de la pression carotidienne et de la tension veineuse, pendant l'expiration, sous l'influence de la respiration artificielle. Le Dr Gautier (b) est venu récemment appeler encore l'attention sur cette inversion des rapports de la respiration et de la pression artérielle.

(1) Leur étude sera faite dans un travail qui sera publié prochainement.

(a) Rosapelly, *Recherches sur la circulation du foie*, Thèse Paris, 1873.

(b) Gautier, *Influences mécaniques de la respiration sur la circulation artérielle*, Thèse, Paris, 1876.

étant incisée et le cerveau mis à nu, l'effet paraît encore bien plus prononcé. La surface cérébrale turgescente fait saillie, en manière de hernie, à travers le trou de la trépanation.

Dans la position inverse, la tête étant en haut, on voit au contraire la dure-mère s'excaver et pâlir; de même, on peut observer, quand cette membrane est enlevée, la pâleur de la surface cérébrale, plus ou moins affaissée. Il nous a semblé intéressant d'enregistrer les mouvements du liquide contenu dans le tube vissé à la boîte crânienne, dans ces deux cas opposés, auxquels se rapportent les figures 186 et 187. Les expériences qu'elles retracent ont été faites sur un chien de forte taille, dont la dure-mère avait été enlevée au niveau de la trépanation. L'animal était chloroformé.

Au commencement des tracés de la figure 186, l'animal est en position horizontale, la respiration retentit faiblement sur le tracé cérébral dont les oscillations artérielles sont bien marquées. A partir du moment indiqué par une flèche, on élève l'arrière-train de l'animal. Le liquide monte aussitôt dans le tube; il en résulte une ascension du tracé cérébral, qui présente alors un plateau avec de très-légères inflexions d'origine cardiaque. C'est qu'à la suite du changement d'attitude de l'animal, le cerveau est venu faire hernie au niveau de l'ouverture, qu'il bouche à la manière d'un obturateur, le liquide cérébro-spinal devant, pendant ce temps, refluer dans le rachis. Dès qu'on replace l'animal dans la situation du début, les oscillations cardiaques et respiratoires reparaissent.

Signalons encore le rhythme respiratoire pendant la durée de cette expérience. Lente au début, la respiration devient fréquente quand on a élevé le train postérieur de l'animal; elle devient ensuite très-lente, quand on revient à la position horizontale.

De même que tout à l'heure, le chien est horizontalement placé au début de l'expérience dont les diverses phases sont reproduites par la figure 187. Les deux sortes d'oscillations cérébrales sont très-nettement marquées à ce moment.

On place l'animal en attitude verticale à partir du point qu'indique une flèche. Aussitôt le liquide baisse notablement dans le tube crânien : une descente considérable du tracé cé-

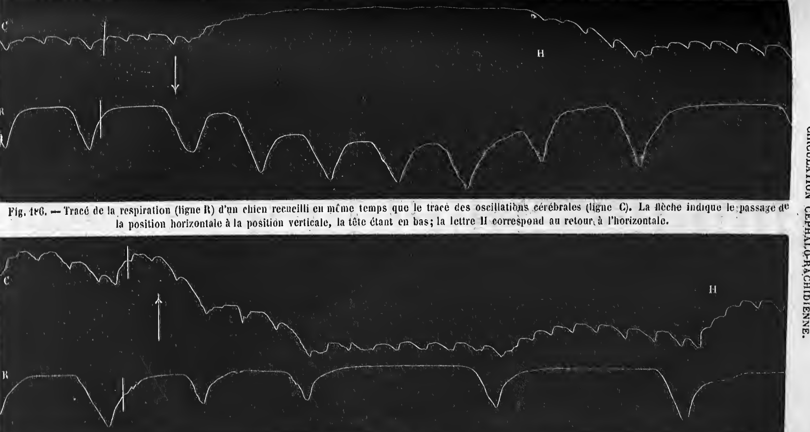


Fig. 186. — Tracé de la respiration (ligne R) d'un chien recueilli en même temps que le tracé des oscillations cérébrales (ligne C). La flèche indique le passage de la position horizontale à la position verticale, la tête étant en bas; la lettre H correspond au retour à l'horizontale.

Fig. 187. — Tracé de la respiration (ligne R) d'un chien, recueilli en même temps que le tracé des oscillations cérébrales (ligne C). La flèche indique le passage de la position horizontale du début à la position verticale, la tête étant en haut. La lettre H indique le retour à l'horizontale.

rébral en est la conséquence. Le liquide remonte et le tracé s'élève, dès qu'on rend à l'animal sa situation première.

Pendant tout ce temps, les oscillations provoquées par les influences cardiaque et respiratoire n'ont cessé de se manifester, la respiration étant devenue deux fois plus lente, quand la tête de l'animal était élevée.

Avant de quitter ce sujet, nous croyons devoir faire remarquer que les modifications des oscillations cérébrales, à la suite des changements d'attitude, rappellent absolument celles que nous avons déjà constatées, en explorant la fontanelle du nouveau-né.

B. — *Trépanations pratiquées au rachis.*

Pour nous rendre un compte exact du mécanisme des mouvements du liquide céphalo-rachidien, nous avons pratiqué à diverses reprises, indépendamment des trépanations crâniennes, des trépanations sur le canal rachidien, tantôt au niveau de la région lombaire, tantôt à celui de la région cervicale (1).

Les développements dans lesquels nous sommes entré au sujet des expériences dans lesquelles le cerveau avait été mis à nu, nous permettront d'être très-bref dans la description des phénomènes constatés dans le cas où une couronne de trépan avait été appliquée sur l'une des vertèbres.

De même qu'au crâne, nous adaptions à l'orifice rachidien un tube de verre approprié et nous y versions du liquide, lequel offrait une série d'oscillations absolument comparables à celles que nous avons étudiées jusqu'ici. Ces oscillations, ordinairement moins prononcées qu'au crâne, étaient encore

(1) La trépanation d'une vertèbre est toujours une opération assez délicate qui provoque souvent une hémorrhagie considérable. Après la section des parties molles, on enlève l'apophyse épineuse de la vertèbre choisie, au moyen de sécateurs ou de daviers appropriés. On procède ensuite à la trépanation de l'os. Nous avons appliqué des couronnes de trépan de 6 à 7 millimètres de diamètre, nous servant, dans ce but, de l'instrument du Dr Garrigou-Desarènes, destiné à pratiquer la térébration de l'apophyse mastoïde. A l'orifice ainsi obtenu, nous adaptions un tube de même diamètre fixé au moyen d'une garniture métallique munie d'un pas-de-vis.

de deux ordres, se rattachant les unes à la respiration, les autres aux systoles cardiaques (1).

Les oscillations cardiaques et même les oscillations respiratoires observées au rachis nous paraissent liées surtout aux *variations du volume de l'encéphale*, l'excès du sang qui pénètre en expiration et à la suite de la contraction du cœur dans la boîte crânienne amenant le départ d'une quantité correspondante de liquide céphalo-rachidien, qui reflue dans la cavité du rachis, pour rentrer dans le crâne quand les vaisseaux intra-crâniens reviennent sur eux-mêmes.

Nous essayerons de justifier cette opinion, dans la deuxième partie de ce travail.

Bornons-nous actuellement à dire que les oscillations du liquide cérébro-spinal ont présenté au rachis les mêmes caractères qu'au crâne, le liquide s'élevant en expiration, s'abaissant en inspiration, ce rapport étant interverti par la respiration artificielle. En un mot, tout ce que nous avons dit au sujet de nos premières expériences peut s'appliquer aussi à celles-ci. Nous donnons à l'appui quelques-uns des tracés que nous avons recueillis dans ces conditions.

La ligne inférieure de la figure 188 reproduit le tracé des oscillations du tube fixé au rachis. Les modifications du niveau du liquide dépendant de la respiration sont représentées par des ondulations étendues dont la montée correspond à l'expi-

(1) Les oscillations commandées par la respiration peuvent s'expliquer en partie par les modifications de calibre des plexus intra-rachidiens, qui se gonflent en expiration, pour diminuer de volume en inspiration.

Quant aux oscillations rhythmées avec le cœur, on pourrait les attribuer à des modifications de volume de la moelle dépendant de l'augmentation de calibre de ses vaisseaux artériels, si l'on ne se rappelait que ces vaisseaux sont de très-faible importance. La pie-mère offre du reste autour de la moelle une structure fibreuse très-serrée, toute différente de celle qu'elle affecte à l'encéphale; cette structure s'oppose encore à des mouvements marqués de dilatation. Aussi tous les auteurs s'accordent-ils à nier aujourd'hui les mouvements de la moelle, qui ont été jadis soutenus, et qu'on confondait avec ceux du liquide sous-arachnoïdien.

Nous ne prétendons pas toutefois qu'une turgescence très-faible, et qui échappe à la vue, ne puisse avoir lieu dans la moelle, aussi bien que dans tous les autres organes non rigides de l'économie; mais elle doit être si restreinte, que nous ne pouvons la considérer, pas plus que l'augmentation de calibre des autres branches artérielles très-peu développées que renferme le canal rachidien, comme la cause principale des oscillations en question.

ration, la descente à l'inspiration, ainsi qu'on peut le constater, en se reportant au tracé de la respiration situé au-dessus du précédent.

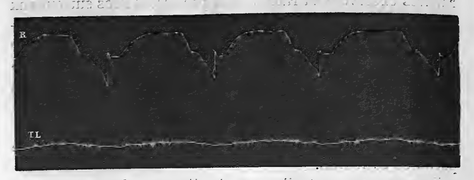


Fig. 188. — Tracé des oscillations du liquide céphalo-rachidien au niveau de la région lombaire (ligne T L), recueilli en même temps que la respiration (ligne R).

Indépendamment des ondulations respiratoires, on observe de petites ondulations qui y sont surajoutées et qui coïncident avec les pulsations artérielles.

Les deux sortes d'oscillations sont peu accusées dans ce tracé ; mais il ne faut pas perdre de vue que nous avons créé en quelque sorte un trou de conjugaison artificiel, et que, autant qu'il est permis d'en juger, les autres trous de conjugaison doivent continuer à remplir leur office, une certaine quantité de graisse fluide s'échappant facilement à travers ces orifices, à chaque augmentation de la pression intra-rachidienne. Ainsi s'explique, croyons-nous, le peu d'ampleur des oscillations que nous venons d'analyser.

L'expérience précédente portait sur une trépanation opérée sur l'une des vertèbres lombaires. Les tracés de la figure 189 ont été recueillis sur un animal dont l'axis avait été trépané. Les oscillations furent bien plus prononcées, dans ces circonstances.

La courbe respiratoire dont le tracé a été obtenu, à l'aide du pneumographe, appliqué sur les parois abdominales, présente ceci de particulier, que non-seulement la respiration, mais encore les battements du cœur s'y trouvent indiqués.

L'inspiration ne détermine, dans le tracé cérébral, qu'un abaissement insignifiant ; l'expiration qui la suit provoque une ascension plus notable.

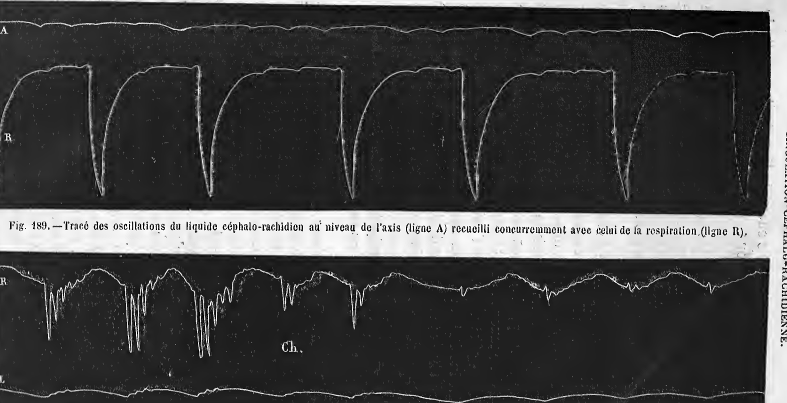


Fig. 189. — Tracé des oscillations du liquide céphalo-rachidien au niveau de l'axis (ligne A) recueilli concurremment avec celui de la respiration (ligne R).

Fig. 190. — Tracé de la respiration (ligne R) et des oscillations du liquide cérébro-spinal (ligne T L), au niveau de la région lombaire. Modification des tracés sous l'influence du chloroforme administré à partir de Ch.

La figure 190 nous montre encore le lien étroit qui rattache les oscillations du liquide sous-arachnoïdien aux modifications respiratoires.

Le tracé supérieur, celui de la respiration offre un rhythme tout spécial, chaque expiration présentant une série de ressauts dont l'amplitude va en diminuant, ce qui tient à ce que la phase expiratoire est entrecoupée par une série d'aboiements.

Nous retrouvons la trace de cette particularité dans le tracé des oscillations du liquide céphalo-rachidien, à la région lombaire. Chaque ondulation dépendant de l'acte respiratoire présente en effet dans sa période d'ascension, c'est-à-dire dans celle qui correspond à l'expiration, quelques petites ondulations qu'il ne faudrait point rattacher à l'influence cardiaque. Vient-on en effet à replacer l'animal sous l'influence du chloroforme, aussitôt on voit la respiration se régulariser peu à peu; les aboiements cessent et les petites ondulations que nous avons signalées disparaissent avec eux.

C. — *Trépanations pratiquées simultanément au crâne et au rachis.*

En appliquant des couronnes de trépan, à la fois au crâne et au rachis, nous avons toujours constaté le synchronisme des mouvements, ou pour mieux dire des oscillations du liquide céphalo-rachidien. On ne saurait donc admettre qu'il y ait antagonisme entre les phénomènes qui se passent dans la cavité crânienne d'une part, dans la cavité rachidienne d'autre part.

La coïncidence des ondulations respiratoires au crâne et au rachis s'observe bien dans la figure 185, p. 376. On y voit que dans le tracé crânien, aussi bien que dans le tracé rachidien, la courbe s'élève pendant l'inspiration, s'abaisse pendant l'expiration, ce qui devait être, l'animal étant soumis à la respiration artificielle, laquelle entraîne, ainsi que nous l'avons exposé, le renversement des phénomènes (*V.* p. 375).

Dans la figure qui suit, on peut mieux observer encore la coïncidence des variations de niveau dans les tubes fixés au crâne et au rachis. La trépanation avait porté sur l'axis.

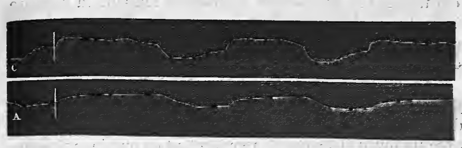


Fig. 191. — Tracés des oscillations du liquide cérébro-spinal au niveau de l'axis (ligne A), et du crâne (ligne C).

Les tracés des ondulations crâniennes et rachidiennes liées à la respiration sont très-nets et sensiblement parallèles. Quant aux oscillations d'origine cardiaque, elles font absolument défaut dans le tracé inférieur, et sont peu marquées dans le premier.

Nous ne multiplierons pas davantage ces exemples, qui ne pourraient que confirmer les conclusions de la partie précédente de ce travail. Aussi n'insisterons-nous pas, nous bornant à attirer spécialement l'attention sur l'importance du *synchronisme des oscillations observées à la fois au crâne et au rachis.*

V. REPRODUCTIONS ARTIFICIELLES DES MOUVEMENTS CÉRÉBRAUX.

1. Reproduction sur un Schéma.

Nous nous étions demandé s'il ne serait pas possible de représenter d'une manière schématique les mouvements encéphaliques, afin d'obtenir synthétiquement les phénomènes que nous avons analysés précédemment, afin de vérifier également si, dans certaines conditions, ces phénomènes peuvent se modifier ou disparaître, comme dans l'organisme vivant.

La figure suivante représente l'appareil dont nous nous sommes servi.

Il se compose d'un ballon rempli d'eau, à deux tubulures B, qui figure la boîte crânienne. Au milieu de l'eau, se trouve un ballon de caoutchouc C, rempli lui-même de liquide, et correspondant à l'encéphale. Il aboutit à un tube de verre

qui traverse le bouchon de caoutchouc fermant la tubulure inférieure du ballon B. Ce tube se continue par un tube de caoutchouc *a* qui représente une artère, et qui part lui-même d'une poire en caoutchouc V, jouant le rôle du cœur.

Le bouchon qui clôt inférieurement le ballon B est traversé par un deuxième petit tube de verre qui s'ouvre d'un côté dans le ballon lui-même, et communique extérieurement avec un tuyau élastique R, représentant ce que le professeur Richet a si justement appelé le « tuyau d'échappement rachidien, » lequel se termine par une poche L qu'on pourra assimiler à « l'espèce d'ampoule qui entoure la queue de cheval » (1) ou à un hydrorachis.

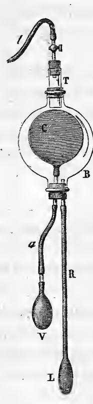


Fig. 192. — Schéma servant à reproduire les mouvements cérébraux.

La tubulure supérieure correspond à une trépanation. Elle est fermée par un bouchon de caoutchouc que traverse un gros tube T, dont le bord inférieur présente une arête vive, analogue à celle du rebord osseux. Ce tube est lui-même

(1) Cruveilhier, *Anat. desc.*, 4e éd., t. III, p. 353.

fermé supérieurement, de même que l'appareil que nous fixions au crâne des animaux de nos expériences, par un bouchon que traverse un petit tube de verre. Celui-ci présente un robinet et se continue par un tube de caoutchouc *t*, que l'on peut mettre en communication avec un tambour enregistreur.

Toutes les pièces de l'appareil étant bien purgées d'air, on s'arrange de telle sorte que le niveau du liquide corresponde à la partie moyenne du tube T. Imprimant alors à la main des oscillations rhythmiques à la poire V (1), on voit se produire, en même temps que des mouvements de dilatation et de retrait du ballon C, déterminés par les variations d'afflux, des oscillations du niveau du liquide dans le tube T. Ces oscillations, correspondant à celles qui sont déterminées par l'influence cardiaque chez l'animal en vie, peuvent être enregistrées au même titre.

Pour imiter l'influence respiratoire, nous avons fait passer le tube *a* par un ballon à trois tubulures, qui n'a pas été représenté, pour ne pas compliquer la figure. La troisième tubulure se continuait par un tube dans lequel nous aspirions et soufflions tour à tour, suivant le jeu naturel de notre respiration.

Nous avons donné naissance de la sorte à un deuxième ordre d'oscillations, plus accentuées, dépendant de l'influence respiratoire.

La figure 193 représente un des tracés que nous avons ainsi obtenus. Les deux ordres d'oscillations y sont très-nets. La descente des grandes ondulations correspond à l'inspiration de même que dans les tracés de nos expériences ; leur ascension est déterminée par l'expiration. Le mode de production de ces doubles oscillations se comprend, sans qu'il soit encore

(1) Nous avons représenté ici le schéma aussi simple que possible; toutefois, nous ne nous en sommes pas tenu à la disposition figurée ici. Nous avons eu recours encore, soit au cœur du schéma de la circulation, du professeur Marey, soit à une petite pompe aspirante et foulante. Dans ces deux cas, nous ne pouvions nous borner au tube d'afflux *a*; il fallait représenter aussi l'écoulement veineux; ce rôle était rempli par un autre tube. Dans ces conditions, l'appareil, tout en se rapprochant davantage de la réalité, perdait de sa simplicité; les effets étaient du reste sensiblement les mêmes.

besoin d'insister à ce sujet, après tout ce que nous avons dit dans le chapitre précédent.

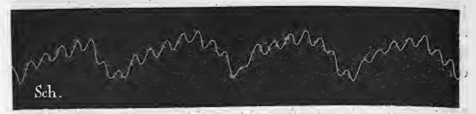


Fig. 193. — Tracé des oscillations respiratoires et cardiaques du cerveau, reproduites schématiquement.

Notre but, en construisant ce schéma, n'était pas seulement d'obtenir la reproduction de ces oscillations. Nous voulions nous assurer également de leur disparition, dans les conditions où elles s'éteignent chez les sujets de nos expériences.

En nous arrangeant de telle façon que la surface du ballon C fût très-voisine de l'ouverture inférieure du tube T, ce ballon arrive, après quelques pulsations du cœur, au contact de cet orifice, dans lequel il fait hernie. Dès lors, les oscillations cessent ou sont tellement minimes qu'elles ne donnent aucun tracé, étant produites uniquement par les très-faibles variations de tension de la petite portion de surface du ballon qui forme hernie dans le tube T. Nous sommes ramené au cas qui s'est souvent présenté dans nos expériences, la petite hernie qui proémine dans le tube T formant bouchon, et ne permettant plus au liquide jouant le rôle de liquide cérébro-spinal de s'échapper à l'extérieur.

Les oscillations ont disparu, avons-nous dit; toutefois le ballon C se dilate encore. A la suite de son augmentation de volume, le liquide périphérique que renferme le ballon de verre est comprimé. Ne pouvant s'échapper en T, il est refoulé dans le déversoir rachidien, dont l'ampoule offre une série de pulsations, correspondant aux systoles du ventricule artificiel.

2. Reproduction artificielle des mouvements cérébraux chez les animaux récemment morts.

Après avoir obtenu la reproduction des oscillations cérébrales, à l'aide d'un schéma approprié, nous avons encore

désiré les reproduire sur l'animal mort. Cette expérience n'est pas nouvelle, il est vrai, puisqu'elle a déjà été faite par Lamure (1) et reproduite par Flourens (2). Ces deux expérimentateurs comprimaient et relâchaient alternativement les parois du thorax d'un animal mort ayant subi une trépanation.

A la suite de cette manœuvre, par laquelle ils se rapprochaient tout à fait des conditions de la respiration normale, ils voyaient le cerveau s'élever pendant la compression de la cage thoracique, dont le relâchement déterminait, par contre, l'abaissement de l'encéphale.

Nous avons reproduit cette expérience sur le chien, peu de temps après la mort, avec des résultats semblables, l'eau s'élevant en expiration, s'abaissant en inspiration, dans le tube fixé au crâne de l'animal.

En ayant recours à la respiration artificielle, telle qu'on la pratique habituellement dans les laboratoires, en d'autres termes, à l'insufflation trachéale, nous avons obtenu des résultats inverses des précédents : le liquide s'élevait pendant l'inspiration, s'abaissait pendant l'expiration.

La figure 194 représente les tracés de la respiration et des oscillations cérébrales, dans ces circonstances.

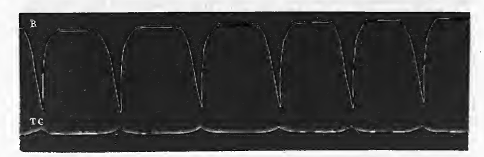


Fig. 194. — Graphique de la respiration artificielle et des oscillations cérébrales qu'elle détermine sur l'animal mort.

Cette inscription *post mortem* vient encore confirmer ce que nous disions dans le chapitre précédent, touchant le renversement des oscillations cérébrales, sous l'influence de la respiration artificielle.

(1) Lamure, Recherches sur la cause des mouvements du cerveau, *Mém. Acad. sciences*, 1749.

(2) Flourens, *loc. cit.*, p. 359 et suiv.

Outre les oscillations respiratoires, nous avons reproduit celles que détermine l'action cardiaque, en injectant, suivant un mode rhythmé, du liquide dans la carotide d'un animal mort.

Nous avons obtenu de même des oscillations cérébrales, en injectant d'une façon analogue de l'eau, par l'intermédiaire des jugulaires.

L'augmentation du calibre des artères ou des veines encéphaliques peut donc déterminer, au même titre, la production d'oscillations dans un tube adapté à la voûte du crâne.

DEUXIÈME PARTIE.

De la circulation dans la cavité céphalo-rachidienne, les parois crâniennes étant inextensibles.

Après la première enfance, les fontanelles s'étant ossifiées, la boîte crânienne est close par des parois rigides, incompatibles avec des modifications de contenu, dans son intérieur.

Dans ces conditions, des variations en plus ou en moins de la quantité de sang que contiennent la cavité crânienne en général et l'encéphale en particulier sont-elles possibles? Peuvent-elles s'effectuer, comme dans le cas où les parois crâniennes ne sont pas entièrement rigides, c'est-à-dire dans les conditions où nous les avons étudiées précédemment, chez l'homme et les animaux?

Telle est la question que nous allons examiner, question d'une haute importance, attendu que, suivant la conclusion à laquelle on aboutit, on arrive à admettre ou à rejeter la possibilité de l'anémie et de la congestion cérébrales.

L'existence de ces états opposés du cerveau, et par conséquent des modifications de vascularisation cérébrale, n'avait jamais été mise en doute, ni même agitée, quand surgit la proposition qui a reçu le nom, dans la science, de théorème de Monro-Kellie (1).

(1) Si, à l'exemple de Jaccoud (*a*) on interprète les vues des deux auteurs

(*a*) Jaccoud, *Pathologie interne*, t. I. Congestion cérébrale, et *Dict. de méd. et chir. pratiques*, article ENCÉPHALE.

Cette théorie fut généralement adoptée (1), aussi bien en France, où nous la trouvons soutenue par Rochoux (2), qu'en Angleterre, où nous voyons Clutterbuck nier la possibilité de congestion et d'anémie du cerveau, et proclamer en conséquence l'inutilité de la saignée, dans les cas où l'on croyait avoir affaire à la congestion de cet organe.

Les expériences de Kellie, sur lesquelles s'étayait sa théorie, furent reprises par Burow, qui arriva à des conclusions tout à fait opposées (3).

Plus décisives encore ont été les expériences dans lesquelles on a pu observer directement, au moyen d'une fenêtre adaptée aux parois crâniennes, les modifications du calibre des vaisseaux encéphaliques pendant la vie.

Cette méthode, instituée par Donders (4), lui a permis de constater des variations notables de réplétion des vaisseaux

qui ont donné leurs noms à cette théorie, en disant que la *quantité de liquide* renfermé dans la boîte crânienne demeure invariable, en vertu de la résistance des parois crâniennes et de l'incompressibilité presque absolue des liquides, cette proposition demeure inattaquable. Il n'en est plus de même, si c'est la *quantité de sang* contenu dans le crâne, dont ils ont voulu affirmer l'invariabilité. Et c'est bien ainsi qu'il faut envisager la question. Comment comprendre autrement l'affirmation de Monro qui veut que le cerveau renferme toujours la même quantité de sang, pendant l'état de santé, pendant la maladie, après la mort? Comment comprendre surtout les conclusions des expériences de Kellie, fondées sur l'absence de congestion cérébrale observée par lui chez des pendus, sur l'absence d'anémie cérébrale chez des animaux qu'il avait fait périr par hémorrhagie, sur la similitude de l'aspect du cerveau qu'il constate après la mort, chez des animaux suspendus les uns par les oreilles, les autres par les pattes postérieures?

(1) La plupart de ses partisans admirent cependant la possibilité de variations inverses de la quantité du sang artériel et veineux contenus dans le crâne, le sang veineux diminuant proportionnellement à l'augmentation du sang artériel, et réciproquement.

(2) Rochoux, *Recherches sur l'apoplexie*, Paris, 1833.

(3) Le cerveau fut trouvé anémié chez les animaux suspendus par les oreilles, tandis qu'il offrait de la congestion chez ceux qui avaient été suspendus la tête en bas. Il est vrai, qu'en appliquant à ces animaux, avant de les dépendre, une ligature serrée autour du cou, Burow se mit à l'abri des causes d'erreur qui avaient dû fausser les résultats obtenus par Kellie. En agissant de la sorte, il évitait les modifications de réplétion sanguine des vaisseaux encéphaliques qui pouvaient se produire en position horizontale. Ces expériences ont été repétées et variées par d'autres expérimentateurs, avec les mêmes résultats.

(4) Donders, Die Bewegungen des Gehirns. *Nederl. Lancet*, 1850.

encéphaliques, qui ont été confirmées par les expériences classiques de Küssmaul et Tenner et par celles de J. Ehrmann qui sont consignées dans son remarquable travail sur l'anémie cérébrale (1).

Cependant, et ce résultat paraît de prime-abord contradictoire, si ces auteurs ont tous observé des changements de calibre des vaisseaux cérébraux, ils s'accordent tous également à noter l'absence de mouvements du cerveau.

Sous ce dernier rapport, ces expériences venaient prêter encore leur appui à celles de Bougougnon.

On n'ignore pas que, pour sa thèse inaugurale soutenue en 1839, cet auteur fit des expériences devenues classiques, pour vérifier l'opinion émise *a priori* par Pelletan, d'après lequel l'inextensibilité des parois crâniennes, après leur ossification complète, devait apporter un obstacle absolu à la production des mouvements cérébraux, dont l'existence chez l'adulte avait déjà été mise en doute par Haller, Lorry, Deschamps, etc.

Bourgougnon, après avoir vissé un tube muni d'un robinet au crâne d'un chien, et après l'avoir rempli d'eau purgée d'air, jusqu'à une certaine hauteur *au-dessus du robinet*, constata les oscillations du liquide et les mouvements de la grande branche d'un levier coudé qui se mouvait autour d'un axe horizontal, et dont la courte branche était terminée par une petite plaque reposant sur la dure-mère ou le cerveau. Le robinet étant fermé, il n'observa plus les mouvements du liquide, chose très-naturelle, par suite de l'incompressibilité des parois et du liquide, qui ne pouvait s'abaisser au-dessous du robinet que s'il se produisait un vide, ce qui n'est point admissible.

Ce n'est toutefois que de l'absence de ces oscillations qu'ont parlé la plupart des auteurs qui ont discuté les expériences de Bourgougnon. Bien plus importante, cependant, était l'absence des mouvements communiqués au levier.

Si les conclusions que tire l'auteur de ces expériences sont exactes, on en comprend toute la gravité, car nier les mou-

(1) Ces résultats ont encore été confirmés par les expériences d'Ackermann et de Leyden.

vements cérébraux, c'est affirmer, sous une autre forme, la proposition de Monro-Kellie, les variations du contenu vasculaire d'un organe devant fatalement amener des modifications de son volume, comme le prouvent avec évidence les expériences modernes sur les changements de volume des organes, dans leurs rapports avec la double influence cardiaque et respiratoire.

Cependant, il n'est point douteux que les observations de Bourgougnon ne soient exactes; il n'est pas moins vrai, comme nous l'avons vérifié nous-même, qu'en vissant une fenêtre aux parois crâniennes, on n'observe pas de mouvements du cerveau. Comment comprendre alors des modifications du contenu vasculaire encéphalique?

Faut-il admettre uniquement avec Bourgougnon, dont l'opinion a été reprise il y a peu de temps par Navalichin (1), des modifications de la tension de l'encéphale, opinion qui est à rapprocher de celle de Longet, pour lequel le cerveau change, non de *volume*, mais de *masse*, c'est-à-dire de densité, si nous comprenons bien cet auteur?

La manière de voir de cet éminent physiologiste nous étonne d'autant plus que, quelques pages auparavant (2), il admet des mouvements du liquide céphalo-rachidien refluant en expiration du rachis dans le crâne, pour rentrer en inspiration dans la cavité rachidienne, de telle sorte que, non-seulement le cerveau ne pourrait se dilater en expiration, mais qu'il serait encore comprimé, à ce moment, par le liquide cérébro-spinal affluant du rachis.

A l'exemple de Richet, de Béclard et de plusieurs auteurs, nous sommes bien plus porté, malgré les expériences en apparence contradictoires, à admettre chez l'adulte l'existence de mouvements cérébraux, disons mieux,

(1) Nous avons reçu récemment, grâce à l'obligeance du professeur Dogiel, un mémoire russe du Dr Navalichin, de Kazan, sur la « Tension du cerveau et ses rapports avec la circulation ». M. de Tarchanoff a bien voulu nous donner la substance de cet ouvrage et nous en traduire les conclusions. Nous regrettons que l'auteur qui avait fait communiquer la boîte crânienne avec un manomètre inscripteur n'ait pas reproduit les tracés des oscillations déterminées par la circulation et la respiration. Son travail conclut à une dépendance réciproque de la fréquence cardiaque et de la tension cérébrale.

(2) Longet, *loc. cit.*, t. III, p. 285.

d'une expansion et d'un retrait alternatifs de l'encéphale, plus bornés sans doute que dans le cas où le crâne est ouvert.

Quelques considérations sont ici nécessaires pour justifier notre dire et pour permettre de comprendre les expériences que nous venons de citer.

La boîte crânienne ne pouvant se dilater, son contenu est par là même immuable. Envisagée de la sorte, la proposition de Monro-Kellie peut encore être soutenue aujourd'hui. Mais il ne faut pas perdre de vue que la cavité crânienne renferme, indépendamment du sang, un autre liquide dont on ne tenait point compte, ne le connaissant pas, à l'époque où les expérimentateurs anglais émirent leur théorie, nous voulons parler du liquide céphalo-rachidien. Or, tout en admettant la constance de la quantité du liquide contenu dans le crâne, il est permis d'admettre que la quantité de liquide sous-arachnoïdien diminue, à mesure que la quantité de sang augmente, et réciproquement.

A cet égard, le rôle du liquide cérébro-spinal est capital, son reflux du crâne vers le rachis permettant à une plus grande quantité de sang de pénétrer dans les vaisseaux intra-crâniens, dans les vaisseaux encéphaliques en particulier. Mais ce flux et ce reflux du liquide céphalo-rachidien du crâne dans le rachis, et réciproquement, est-il possible? Les dimensions du trou occipital, comparées au diamètre des parties qui le traversent, tendent à le prouver.

Les preuves directes ne manquent pas du reste. Nous citerons les suivantes, qui nous paraissent irréfutables :

1° En pratiquant une trépanation, à la région lombaire d'un cadavre placé verticalement, et respectant les méninges, on voit celles-ci proéminer fortement, dès le moment où une ouverture faite à la voûte du crâne permet au cerveau de s'affaisser et à une partie du liquide contenu dans la boîte crânienne de refluer dans le rachis. Ce passage du liquide n'a pu s'opérer que par le trou occipital;

2° En comprimant la tumeur formée par un hydrorachis, on provoque un reflux inverse de la cavité rachidienne vers le crâne, lequel est prouvé par la tension que présentent les fontanelles, qui bombent fortement à la suite de cette manœuvre;

3° Après avoir trépané le crâne et le rachis d'un animal, mort ou en vie, nous adaptons aux orifices ainsi obtenus deux tubes de verre, dans lesquels nous versons du liquide; nous faisons alors varier l'attitude de l'animal, amenant en haut, tantôt sa tète, tantôt son arrière-train. Dans les deux cas, nous voyons se produire un phénomène analogue, le liquide baissant notablement dans le tube le plus élevé, s'élevant dans le tube situé plus bas : ce sont de vrais vases communiquants;

4° Laissant l'animal en position horizontale, nous soufflons dans l'un des tubes : aussitôt, le liquide monte dans le tube opposé.

Ces diverses expériences nous semblent décisives, et nous en concluons que le trou occipital permet un libre passage au liquide céphalo-rachidien.

La quantité de sang reçue par le cerveau étant plus considérable à la suite de la systole cardiaque, une quantité de liquide cérébro-spinal correspondant à l'excès sanguin doit abandonner au même moment la boîte crânienne, pour se porter dans la cavité rachidienne.

De même, les vaisseaux intra-crâniens renfermant plus de sang, à la suite des fortes expirations, de l'effort, etc., le liquide sous-arachnoïdien reflue également, sous cette influence, dans la cavité rachidienne, pour revenir dans le crâne, à l'inspiration suivante.

Suivant l'expression du professeur Richet, « le canal rachidien doit être regardé comme le tuyau d'échappement, au moyen duquel s'effectuent ces oscillations antagonistes du sang et du liquide céphalo-rachidien, sans lequel elles eussent été impossibles. » Ces oscillations peuvent s'effectuer grâce à l'existence des plexus rachidiens, éminemment compressibles, que Küss, notre maître regretté, assimilait à une « soupape de sûreté », grâce aussi à l'existence du tissu cellulo-adipeux existant dans le rachis autour de la dure-mère, lequel peut refluer en dehors du canal, par les trous de conjugaison, sous l'influence de l'afflux du liquide céphalo-rachidien, dans la cavité du rachis.

Si l'on pratique au crâne une ouverture artificielle, on crée

de la sorte un orifice qui montre aux yeux ce qui se passe dans un crâne fermé, au niveau du trou occipital.

A chaque systole, à chaque expiration, le liquide s'élève dans le tube vissé à cet orifice, de même qu'il reflue normalement par le trou occipital, dans la cavité rachidienne.

L'expérience de Bourgougnon ne nous parait pas contraire à cette théorie, et nous nous expliquons l'immobilité du levier dans les conditions où elle a été obtenue.

Dans l'état normal, en effet, le cerveau appuie contre la voûte crânienne, dont il est séparé par les méninges et une couche à peine appréciable du liquide céphalo-rachidien, dont la plus grande partie est située à la base de l'encéphale, aux endroits nommés confluents antérieur et postérieur de ce liquide. L'encéphale, devenant plus turgescent, ne peut dès lors offrir à sa partie supérieure qu'un mouvement de glissement, une dilatation effective n'étant possible que dans les régions inférieures de l'organe, régions baignées dans un liquide qui peut facilement s'échapper par le trou occipital qui touche le confluent postérieur.

Cette conception n'est pas seulement une vue de l'esprit. Nous l'avons vérifiée à l'aide de l'appareil schématique que représente la figure 192 et que nous avons décrit page 385. En fermant le robinet qui surmonte le tube fixé à la partie supérieure de l'appareil, et imprimant au cœur artificiel une série de contractions rhythmées, nous voyons le ballon remplissant le rôle d'encéphale arriver au contact de l'orifice inférieur du tube assimilable au tube d'exploration vissé au crâne des animaux. Dès ce moment, la petite portion de surface du ballon circonscrite par le rebord de ce tube demeure immobile, et cependant le ballon lui-même se dilate et revient sur lui-même successivement, suivant que nous comprimons ou que nous abandonnons à elle-même la poire de caoutchouc qui représente le cœur.

Dans ces conditions, où reflue le liquide qui entoure le ballon à parois dépressibles, liquide renfermé lui-même dans le ballon en verre, dont les parois sont inextensibles? Il s'échappe dans le tube qui remplit l'office de déversoir rachidien, ainsi qu'en témoignent les pulsations de l'ampoule

terminale, pulsations synchrones aux contractions de l'ampoule ventriculaire et aux dilatations du ballon représentant le cerveau.

Ouvrons-nous le robinet, aussitôt les pulsations rachidiennes cessent, et les oscillations reprennent dans le tube d'exploration, où elles se produisent plus facilement, n'ayant pas à vaincre l'élasticité du tube rachidien et de son ampoule terminale; en même temps, la surface du ballon s'approche et s'éloigne alternativement un peu de l'orifice inférieur du tube explorateur. C'est identiquement ce qui se passait dans les expériences de Bourgougnon.

L'absence des mouvements, constatée dans les expériences dans lesquelles on pratique une fenêtre aux parois crâniennes, absence qui semble paradoxale, puisqu'elle coïncide avec des modifications visibles du calibre des vaisseaux encéphaliques, s'explique de même. Dans toutes ces expériences on voit le cerveau immédiatement accolé au verre. C'est qu'en effet, dans le crâne, dont les parois sont absolument rigides, la surface des hémisphères vient au contact de la voûte crânienne sur laquelle l'organe prend en quelque sorte son point d'appui, son augmentation de volume se traduisant au sein du liquide qui baigne sa base, c'est-à-dire la région qui présente les vaisseaux les plus considérables, ceux dont la pulsation est la plus active.

Ces expériences, qui d'abord semblent absolument incompatibles avec la production de mouvements d'expansion et de retrait de l'encéphale, par conséquent aussi avec la possibilité de variations de contenu vasculaire de cet organe, n'infirment cependant nullement la réalité de ces phénomènes qui, ainsi compris, replacent dans des conditions moins opposées la circulation encéphalique chez le nouveau-né et chez l'adulte, les trous de conjugaison remplissant l'office de fontanelles chez ce dernier.

Concluons en disant que les phénomènes que nous avons analysés dans la première partie de ce travail se rencontrent également, atténués peut-être, chez l'homme et les animaux dont les parois crâniennes sont complétement ossifiées.

Les vaisseaux contenus dans le crâne, ceux de l'encéphale en particulier, peuvent donc être le siége de modifications de calibre

entraînant, grâce à l'extensibilité des parois du rachis, *des changements de volume de l'organe lui-même, qui ne se sépare point, à cet égard, des autres organes de l'économie.*

CONCLUSIONS.

1. Les modifications de calibre des vaisseaux encéphaliques sont la cause du phénomène auquel on a donné le nom de mouvements du cerveau. Ces variations du calibre vasculaire sont liées à l'influence cardiaque et respiratoire; elles entraînent des changements rhythmés du volume de l'encéphale, dont la turgescence augmente et diminue tour à tour.

2. Les mouvements du cerveau peuvent être directement observés dans le cas où la rigidité des parois crâniennes n'est pas absolue, c'est-à-dire chez le nouveau-né, dont les fontanelles ne sont pas encore ossifiées, dans de nombreux cas morbides amenant un ramollissement ou une perte de substance de la voûte crânienne; enfin, à la suite de la trépanation pratiquée sur l'homme ou sur les animaux.

3. Dans ces diverses circonstances, on peut obtenir, au moyen de procédés graphiques, les tracés de ces mouvements. C'est sur eux que s'appuient les conclusions suivantes.

4. La systole cardiaque traduit seule son influence sur les battements de la fontanelle antérieure de l'enfant, pendant l'état de calme parfait et pendant le sommeil. L'enfant étant agité, et la respiration plus prononcée, celle-ci influe à son tour sur les battements de la fontanelle, d'autant plus qu'elle s'accentue davantage.

5. Quand la respiration est profondément modifiée par des actes tels que l'effort, les cris, la toux, le bâillement, l'éternuement, la succion, les battements de la fontanelle concordent avec les modifications respiratoires dont les effets sont parfois

exagérés, au point de dissimuler absolument l'influence cardiaque.

6. La tension de la fontanelle varie avec l'attitude de l'enfant : elle est d'autant plus prononcée que la tête se trouve portée plus bas.

7. Chez l'adulte, dont la *rigidité normale* des parois crâniennes a disparu, on constate que ce n'est que lorsque la respiration est exagérée, ainsi qu'il arrive lors des efforts, qu'elle exerce une influence sur les mouvements cérébraux, qui dépendent uniquement de l'influence cardiaque, quand la respiration est calme.

8. Quand on adapte au crâne d'un animal trépané un tube contenant un liquide, on voit celui-ci présenter des oscillations qui traduisent les mouvements d'expansion et de retrait de l'encéphale. Leur inscription montre qu'elles sont de nature double, et qu'elles se rattachent, les unes à la respiration qui détermine des modifications de réplétion artérielle et veineuse, les autres à l'augmentation du calibre artériel liée à la systole cardiaque. Ces dernières donnent un tracé assimilable à celui du pouls.

9. Les oscillations d'origine respiratoire, d'autant plus accusées que l'animal est moins calme, peuvent arriver jusqu'à voiler les oscillations d'origine cardiaque, qui paraissent en général d'autant mieux que les oscillations se rattachant à la respiration sont moins prononcées.

10. Les oscillations dépendant de la respiration peuvent s'éteindre complétement dans la période d'insensibilité amenée par les anesthésiques.

11. Les anesthésiques administrés brusquement à un animal peuvent provoquer leur disparition momentanée, par suite d'un arrêt respiratoire.

12. La respiration artificielle renverse le mode de production des oscillations du liquide, qui, normalement, s'élève en expiration et s'abaisse en inspiration.

13. Les changements du niveau du liquide, sous l'influence des variations d'attitude, permettent de constater l'augmentation notable du volume encéphalique, quand on abaisse la tête de l'animal, sa diminution, quand on l'élève.

14. Le crâne étant ouvert, les oscillations font parfois dé-

faut, le cerveau faisant hernie et bouchant l'orifice de trépanation, auquel cas le liquide céphalo-rachidien reflue dans le rachis.

15. On peut vérifier ce phénomène au moyen d'un appareil schématique approprié, lequel permet également de reproduire les deux sortes d'oscillations signalées.

16. Ces oscillations peuvent encore être déterminées sur le cadavre, par la respiration artificielle et l'injection de liquide dans les carotides.

17. En pratiquant une trépanation au rachis, on observe des oscillations de même ordre qu'au crâne.

18. Les oscillations d'origine cardiaque et respiratoire, observées simultanément au crâne et au rachis, sont synchrones.

19. La quantité des liquides contenus dans un crâne complétement ossifié est toujours la même; des variations inverses se produisent toutefois entre la quantité du sang et la quantité du liquide céphalo-rachidien, qui, grâce à l'extensibilité partielle des parois de la cavité rachidienne, peut refluer dans celle-ci quand le volume encéphalique augmente, pour rentrer dans la boîte crânienne, quand il diminue.

20. La rigidité de la boîte crânienne n'empêche pas la production de *changements de volume de l'encéphale*, auquel s'appliquent par conséquent aussi les résultats observés dans le cas où les parois crâniennes ne sont pas inextensibles.

TABLE DES FIGURES

APPAREILS.

I. Appareils pour l'exploration.

Appareils Enregistreurs.

APPAREILS SCHÉMATIQUES.

FIGURES SCHÉMATIQUES.

TABLEAUX.

TRACÉS.

Tracés des mouvements du cerveau.

Tracés des changements du volume de la main.

Tracés des mouvements phonétiques.

Tracés des mouvements des muscles.

Tracés des variations de la pression artérielle.

Tracés manométriques.

Tracés sphygmographiques.

TABLE ANALYTIQUE ET ALPHABÉTIQUE

DES MATIÈRES

A

C

Changements du volume de la main.

I

M

P

S

V

Clichy. — Imprimerie PAUL DUPONT, rue du Bac-d'Asnières, 12. (767, 10-6.)